

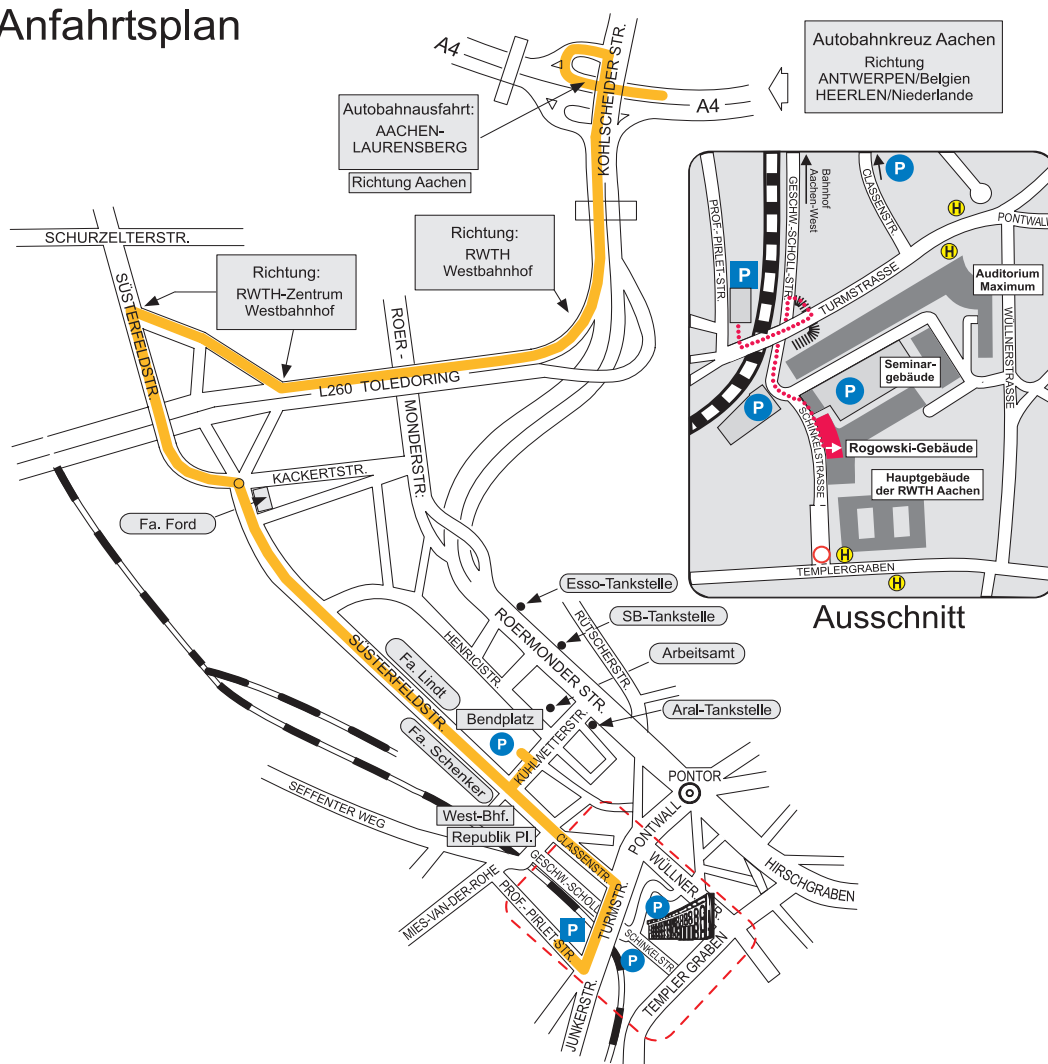


Jahresbericht 2010

Institut für Hochspannungstechnik
Schinkelstraße 2
52056 Aachen

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

Anfahrtsplan



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

Redaktion: Dipl.-Ing. A. Strauchs, Dipl.-Gwl. M. Keller

Redaktionsschluß: 31.12.2010

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

Forschung am IFHT

Forschungsgebiete	8
Berichte aus der Forschungsgruppe Leistungsschalter	12
Berichte aus der Forschungsgruppe Isoliersysteme und Diagnostik	19
Berichte aus der Forschungsgruppe Nachhaltige Energiesysteme	32
Berichte aus der Forschungsgruppe Netzsystemtechnik und Asset Management ..	45
Berichte aus dem Forschungsgebiet Störlichtbögen	59
Dissertationen	62
HumTec	78
Freileitungsmonitoring	81

Lehre am IFHT

Vorlesungen und Praktika	84
Diplom-, Master-, Bachelor- und Studienarbeiten	86
Seminare	111

Das Institut

Chronik	116
Veröffentlichungen	120
Technische Exkursionen	125
Dienstleistungen	133
Prüf- und Qualifizierungszentrum	134
Hochspannungstechnische Gesellschaft an der RWTH Aachen e.V.	138
EEIM Award 2010	140
Mitarbeiter	144

Sehr geehrte Freunde und Partner des Instituts, sehr geehrte Damen und Herren,

die Energietechnik hat aktuell einen medialen Stellenwert erhalten, den wir uns vor 20 Jahren gewünscht hätten - heute führt diese öffentliche Beachtung jedoch zunehmend zu stärker werdendem politischen Aktionismus und ausufernden Diskussionen über Sinn, Zweck und Wegen zu einer „Energie-wende“. Richtig ist natürlich, dass wir die Energieversorgung grundlegend reformieren müssen - eine Aufgabe, die aufgrund der herausragenden volkswirtschaftlichen und sicherheitstechnischen Bedeutung gut vorbereitet werden muss und keinen Raum für übereilte Experimente und politische Spiele zulässt.

Neben der sicheren, zuverlässigen, nachhaltigen und preiswerten Bereitstellung von Energie gewinnt die Thematik der öffentlichen Akzeptanz eine zunehmend wichtigere Bedeutung. Dieses gilt insbesondere für nicht erneuerbare Energieträger sowie die Netzinfrastuktur, deren Aufbau bzw. Umsetzung - wenn überhaupt - nur mit großem Überzeugungsaufwand möglich ist. Dieses bestärkt uns in unserer Auffassung zu einer ganzheitlichen Betrachtung der Energieversorgung - ausgehend von Konzepten und Szenarien über Technologien und Systemen bis zur ethischen, wirtschaftlichen, ökologischen und ökonomischen Bewertung von Alternativen und Handlungsoptionen. Wir glauben, durch unsere Forschungsinhalte und -struktur für eine solche ganzheitliche Betrachtung gut aufgestellt zu sein, um einen gestalterischen Beitrag zur Energieversorgung der Zukunft leisten zu können.

Hierzu soll Ihnen der vorliegende Jahresbericht 2010, der erstmalig getrennt in deutscher und englischer Ausgabe vorliegt, einen kurzen aber prägnanten Überblick über unsere Themen, Arbeiten und Ergebnisse verschaffen. Die Aufteilung wurde erforderlich, um die Darstellung der For-

schungsarbeiten beibehalten zu können und gleichzeitig dem starken Wachstum der Themen und damit auch der Anzahl der Berichte Rechnung tragen zu können.

Das zehnte Jahr meiner Zeit als Leiter des Instituts für Hochspannungstechnik war geprägt vom inhaltlichen und personellen Wachstum:

- *Das Drittmittelvolumen 2010, d.h. die im Kalenderjahr getätigten Ausgaben von „Nicht-Haushaltsmitteln“, belief sich auf über 3 Mill. Euro mit weiter steigender Tendenz.*
- *Es fanden 250 mündliche Prüfungen in unseren Kernvorlesungen und zusätzlich mehr als 200 schriftliche Prüfungen in den beiden Vorlesungen im Rahmen des Bachelor-Studiengangs statt.*
- *Mehr als 60 Studienabschlüsse (Bachelor, Master, Diplom) wurden am IFHT abgelegt.*
- *17 wissenschaftliche Mitarbeiter wurden, z.T. temporär, integriert.*
- *Acht IFHT - Mitarbeiter wurden mit renommierten Auszeichnungen bedacht*
- *Fünf Dissertationen wurden 2010 abgeschlossen.*
- *Eine Vielzahl von neuen interessanten Projekten konnten gestartet werden oder befinden sich in der Entwicklung.*

Wir können nicht verschweigen, dass diese Entwicklung, so erfreulich sie ist und so positiv sie sich darstellen lässt, uns 2010 unsere Grenzen aufgezeigt und uns an die

Schwelle des mit universitären Strukturen Umsetzbaren gebracht hat. Die Tatsache, dass unsere Mitarbeiter trotz der hohen Auslastung wiederum mit einer Vielzahl von Auszeichnungen geehrt wurden, macht uns natürlich stolz und dokumentiert wiederum, dass (starkes) Wachstum nicht zwangsläufig zu Qualitätsverlust führen muss - ein Aspekt, der gerade für eher Wachstum-unerfahrene Hochschulen wichtig ist.

Mit fünf abgeschlossenen Dissertationen (Dr. Kittipong Anantanavich, Dr. Ming Chark Tang, Dr. Stefan Federlein, Dr. Michael Keßler, Dr. Torsten Wirz) können wir auf ein wissenschaftlich erfolgreiches Jahr 2010 zurückblicken. Auch für die Folgejahre sind im Durchschnitt jährlich fünf bis sechs Dissertationen zu erwarten. Frau Anja Strauchs (IEEE DEIS Graduate Award) und Herr Andrey Mashkin (EEIM Award) wurden für ihre Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der syntaktischen Schäume ausgezeichnet, während die Herren Daniel Eichhoff (ABB-Diplompreis), Philipp Masmeier (Otto-Junker-Preis) und Stanislav Votruba (SAG Preis, 2. Platz) für ihre Abschlussarbeiten ausgezeichnet wurden. Besonders erfreulich ist der Gewinn für das studentische Projekt „Plug into Future“ im Rahmen des BMBF-Wettbewerbs „Energie für Ideen“ 2010, das die Herren Bartho-

lomäus Wasowicz und Fabian Potratz in enger Abstimmung mit Herrn Thomas Dederichs durchgeführt haben.

Weitere Informationen zu unseren Lehr-tätigkeiten, den Forschungsarbeiten, dem Aufbau des „Testzentrums für Speichersysteme und Smart Grid Technologien“ und dem Institutsleben entnehmen Sie bitte den folgenden Seiten.

An dieser Stelle möchte ich allen Freunden und Partnern für die freundliche Förderung und die vielen Anregungen sowie den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern für ihr Engagement und ihre Kreativität sehr herzlich danken.

Wir verstehen den Erfolg der vergangenen Jahre als Bestätigung unserer Arbeit und gleichzeitig als Anreiz, uns kontinuierlich zu verbessern, neue Wege zu beschreiten und gemeinsam mit Ihnen den Umbau der Energiesysteme voranzutreiben.

Herzliche Grüße aus Aachen
Ihr



Aachen, im Januar 2011



9



Institut für Hochspannungstechnik

Forschung am IFHT



Forschungsgebiete

Forschungsgruppe „Leistungsschalter“

Gruppenleiter: Dipl.-Ing. Andreas Kurz

Kurzbeschreibung:

Leistungsschalter stellen eines der wichtigsten Sicherheitselemente in elektrischen Energieversorgungssystemen dar. Daher ist es von großer Bedeutung, die physikalischen Vorgänge, die hinter einem Ausschaltvorgang stehen, nachvollziehen zu können. Um diesem Ziel näher zu kommen, werden in der Forschungsgruppe zwei verschiedene Ansätze verfolgt. Einerseits werden die Vorgänge mittels sogenannter CFD-(Computational-Fluid-Dynamics)-Simulationen nachgebildet. Damit können wichtige Informationen über sonst nur schwer zugängliche Parameter, wie z. B. die Temperatur gewonnen werden. Andererseits verfügt die Forschungsgruppe über das notwendig Equipment und Know-How, um sich den Effekten auch von der experimentellen Seite her zu nähern. Im Rahmen der Entwicklung von neuen Schaltkonzepten gehören Temperatur- und Druckmessungen sowie die Messung der Gasströmung und der maximalen Ausschaltleistung zu den grundlegenden Untersuchungstechniken.

Gruppenmitglieder:

Dipl.-Ing. Mathias Behle (bis Mai) * Dipl.-Ing. Daniel Eichhoff * Dipl.-Ing. Matthias Hofacker * Dipl.-Ing. Andreas Kurz * Dipl.-Ing. Gregor Nikolic * Dipl.-Ing. Ming-Chark Tang (bis April)

Studentische Hilfskräfte:

Stefan Buß * Polson Keeratibumrungspong * Tim Kubiczek * Andreas Meyer * Thien-duc Nguyen * Gregor Nikolic * Karl Oberdieck * Michael Weuffel * Tobias Wild

Forschungsgruppe „Isoliersysteme und Diagnostik“

Gruppenleiter: Dr.-Ing. Michael Keßler

Kurzbeschreibung:

Die Forschungsgruppe bearbeitet ein weites Themengebiet von der Entwicklung neuartiger Isolierstoffe bis zur Zustandsbewertung von Isoliersystemen mittels verschiedener Diagnosemethoden. Bei den Untersuchungen zu Hybridisoliersystemen steht die Weiterentwicklung von syntaktischen Schäumen als Isolierstoffe mit niedriger spezifischer Dichte im Vordergrund. Hier wird insbesondere der Zusatz von Nanopartikeln zur Reduktion der Mischviskosität untersucht. Aber auch neue Einsatzmöglichkeiten wie die elektrische Isolierung von Supraleitern mittels syntaktischer Schäume werden betrachtet.

Auf dem Gebiet der Diagnostik steht die Zustandsbewertung polymerer Isoliersysteme mittels Ultraschall im Mittelpunkt. Neben der Detektion von eingeschlossenen Fehlstellen in verschiedenen Materialien wie Elastomeren (z.B. Muffenkörper) können zudem Grenzflächen- und Vernetzungsprobleme nachgewiesen werden. Eine neue Anwendung der Ultraschalldiagnostik stellt die Temperaturmessung an inneren Grenzflächen dar. Ein weiterer Forschungsschwerpunkt liegt in der Verbesserung der Effizienz von Zündsystemen mittels „Multisparkzündung“. Dabei wird die Spule derart betrieben, dass anstelle eines kon-

zentrierten Einzelzündfunktens viele kurze Entladungen in serieller Folge erzeugt werden, um eine gleichmäßige Zündung des Kraftstoff-Luftgemisches sicherzustellen.

Gruppenmitglieder:

Dipl.-Ing. Gregor Brammer * Dr.-Ing. Michael Keßler * Dipl.-Ing. Jens Knauel * M. Sc. Andrey Mashkin * Dipl.-Ing. Benjamin Preidecker (Daimler AG) * Dipl.-Ing. Christoph Roggendorf * Dipl.-Ing. Anja Strauchs * Dipl.-Ing. Daniel Winkel

Studentische Hilfskräfte:

Denys Demenko * Paul Duisberg * Henning Frechen * Pierre Honoré * Sebastian Kamps * Patrick Poss * Alexa Rombach * Christoph Schneider * Stefan Seibel * Daniel Vobis * André Wagner * Matthias Wiesmann * Serdar Yildiz

Forschungsgruppe „Nachhaltige Energiesysteme“

Gruppenleiter: Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Thomas Dederichs

Kurzbeschreibung:

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

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

Gruppenmitglieder:

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Thomas Dederichs * Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Markus Gödde * Dipl.-Ing. Thomas Helmschrott * Dipl.-Ing. Stefan Krengel * Dipl.-Ing. Claas Matrose * Dipl.-Ing. Hendrik Natemeyer * Dipl.-Wirt.-Ing. Baris Özalay * M. Sc. Thomas Pollok * Dipl.-Ing. Martin Scheufen * Dipl.-Wirt.-Ing. Eva Szczechowicz * Dipl.-Wirt.-Ing. Bartholomäus Wasowicz * Dipl.-Ing. Sebastian Winter

Studentische Hilfskräfte:

Mitra Ariatabar * Reinhold Bertram * Christian Bredtmann * Philipp Erlinghagen * Pascal Golor * Philipp Grüneberg * Andreas Haidl * Mirco Hinnenkamp * Julie Kramer * Sören Kreimeier * Shanta Kumar * Julian Langstädtler * Moritz Mittelstaedt * Mark Müller Giebeler * Thomas Nemeth * Florian Nießen * Tim Noffz * Jens Noschinski * Cora Sophie Petino * Fabian Potratz * Stephan Rath * Erik Reimann * Annika Reitz * Andreas Roehder * Yvonne Surmann * Julia Tecklenburg * Philipp Tünnerhoff * Johannes Turinsky

* Markus vor dem Berge

Forschungsgruppe „Netzsystemtechnik und Asset Management“

Gruppenleiter: Dipl.-Ing. Christian Hille

Kurzbeschreibung:

Die Forschungsgruppe Netzsystemtechnik und Asset Management beschäftigt sich mit dem sicheren, zuverlässigen und effizienten Betrieb elektrischer Netze. Wir legen Wert auf die Feststellung, dass hierzu ein grundlegendes, detailliertes Verständnis zum Verhalten einzelner Betriebsmittel und Netzkomponenten eine notwendige Voraussetzung zur Erfassung des Gesamtsystems ist. Andererseits stellt die systemische Betrachtung zusätzlich die Identifikation und Beschreibung emergenter Eigenschaften sicher.

Fragestellungen in Bezug auf Leistungsfähigkeit, Zuverlässigkeit und Nutzungsdauer eingesetzter Betriebsmittel liegen hierbei im Fokus der Betrachtungen. In Zusammenarbeit mit Netzbetreibern sowie Herstellern von Betriebsmitteln und Diagnosesystemen werden aktuelle Herausforderungen im Bereich der Zustandserfassung und -prognose, der Asset-Simulation unter Einbezug der Anreizregulierung und des Online-Monitorings bearbeitet. Besonderes Augenmerk liegt derzeit zudem auf der Schutztechnik in heutigen und zukünftigen Verteilungsnetzen. Die massive Integration dezentraler Erzeuger und Speicher macht klassische Annahmen zu den Betriebsbedingungen der Verteilungsnetze ungültig. In einer ganzheitlichen Sichtweise von Einzelkomponenten und System werden Schutzsysteme in ihrer Leistungsfähigkeit analysiert und neu konzipiert. Damit soll der geschützte Netzbetrieb in heute bestehenden und zukünftigen Verteilungsnetzen sichergestellt sowie einer langen Koexistenz der verschiedenen Verteilungsnetzausprägungen Rechnung getragen werden. Ziel ist ein technisch-wirtschaftlicher Vergleich verschiedener Optionen zur Ableitung gesamtwirtschaftlich optimaler Handlungsempfehlungen.

Gruppenmitglieder:

M. Sc. Tirinya Cheumchit * Dipl.-Ing. Stylianos Filippidis * Dipl.-Ing. Christian Hille * Dipl.-Ing. Tilman Wippenbeck

Studentische Hilfskräfte:

Tim Gaßmann * Karina Klusmann * Pascal Koehn * Simon Sandor

Lehrgebiet „Gasentladungstechnik“

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

Kurzbeschreibung:

Störlichtbögen in elektrischen Anlagen bewirken einen Temperatur- und Druckanstieg in Schaltanlagen und -gebäuden. Die Störlichtbogensicherheit kann im Prinzip auf zwei Wegen nachgewiesen werden, experimentell durch Störlichtbogenprüfungen und theoretisch über Druckberechnungen. Druckberechnungen haben den Vorteil, dass sie auch für solche Anwendungen durchgeführt werden können, für die keine experimentelle Möglichkeiten vorliegen, z.B. wenn bereits im Planungsstadium Auswirkungen auf Gebäude zu ermitteln

sind. Die vorhandenen Berechnungsverfahren sollen u.a. im Hinblick auf SF₆-isolierte Anlagen erweitert werden. Hierbei treten veränderliche SF₆-Luft-Gemische im Entlastungsraum auf. Durch Vergleich mit vorhandenen Messergebnissen kann das erweiterte Berechnungsverfahren evaluiert werden. Eine weitere Problematik betrifft den Ersatz von SF₆ durch Luft aus Gründen des Umweltschutzes bei der Prüfung von SF₆-isolierten Schaltanlagen. Hier soll herausgefunden werden, ob Bedingungen angebbbar sind, unter denen Prüfungen mit Luft solche mit SF₆ ersetzen können.

Gruppenmitglieder:

M. Sc. Kittipong Anantavanich



Messeinrichtung zur Untersuchung der ortsabhängigen Widerstandsverteilung eines beblasenen Schaltlichtbogens

Zur Entwicklung von Gasleistungsschaltern werden seit vielen Jahren Computational-Fluid-Dynamics-Simulationsrechnungen verwendet. Die hierbei genutzten physikalischen Modelle werden zur Überprüfung ihrer Gültigkeit vielfach experimentell verifiziert. Die örtliche Widerstandsverteilung des Lichtbogens konnte als wesentliche Größe zur Bestimmung des Ausschaltverhaltens eines Leistungsschalters bisher experimentell nicht erfasst werden, da bisher geprüfte Verfahren den Lichtbogen und die Gasströmung entweder erheblich beeinflussen oder nur für spezielle Randbedingungen anwendbar sind. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wird eine neue Methode entwickelt, die es erlaubt, die Widerstandsverteilung eines beblasenen Schaltlichtbogens experimentell zu bestimmen.

Einleitung

Leistungsschalter sind wichtige Elemente unserer heutigen Energieversorgung. Sie sind dafür verantwortlich, den Strom im Nennbetrieb, aber auch im Fehlerfall sicher abzuschalten. Im Falle einer Schalthandlung muss der Leistungsschalter den Strom während dessen natürlichen Nulldurchgangs abschalten. Dazu wird der sich bildende Lichtbogen gekühlt. Eine Aussage darüber, ob die Kühlung für das Abschalten eines SF₆-Schalters ausreicht, lässt sich mit Hilfe des Lichtbogenwiderstandes 200 ns vor dem Stromnulldurchgang (R_{200}) treffen [1]. Durch verschiedene Kühlmechanismen entlang des Lichtbogens ergibt sich eine Widerstandsverteilung innerhalb der Lichtbogenzone. Eine Erfassung der örtlichen Widerstandsverteilung erlaubt daher Rückschlüsse auf die wirkenden Kühlmechanismen und deren Einfluss auf das Abschaltverhalten des Leistungsschalters [2].

Vorgehensweise

Zur Messung der örtlichen Widerstandsverteilung des Lichtbogens wird der Potentialabfall entlang der Lichtbogenachse bestimmt. Bei Kenntniss des Stromes kann daraus die Widerstandsverteilung berech-

net werden. Auf die Potentialverteilung soll durch Erfassung des den Lichtbogen umgebenden elektrischen Feldes geschlossen werden. Hierzu ist ein Referenzpotential erforderlich, welches durch die Anordnung eines geerdeten, leitenden Zylinders um die Isolierstoffdüse geschaffen wird. Die Messung des Lichtbogenpotentials erfolgt über eine Messelektrode, die, wie das Schema in Abbildung Abb. 1 zeigt, zwischen Düsenmaterial und metallischem Zylinder eingebracht wird.

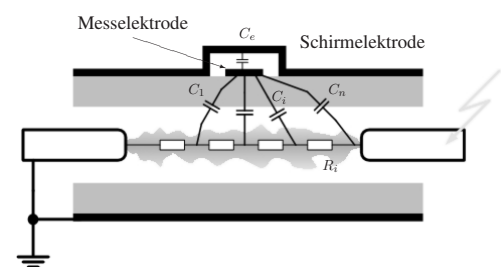


Abb. 1: Messprinzip (schematisch)

Durch das Düsenmaterial als Dielektrikum wird die Elektrode räumlich vom Lichtbogen getrennt. Bei diesem Aufbau handelt es sich um eine kapazitive Feldsonde. Zwischen Elektrode und geerdetem Mantel bildet sich eine Koppelkapazität C_e aus. Weiterhin ergeben sich Streukapazitäten C_i zwischen Lichtbogen und leitender Elektrode. Die Summe aller Streuka-

kapazitäten $C_1 \dots C_n$ ist die Koppelkapazität zwischen Sensor und Lichtbogen. Der Aufbau entspricht einem kapazitiven Teiler mit den Kapazitäten C_i als Oberkapazität und der Erdkapazität C_e als Unterkapazität. Zur Messung der Potentialverteilung werden mehrere Sensoren entlang des Lichtbogens angeordnet. Sie messen jeweils eine Teilspannung.

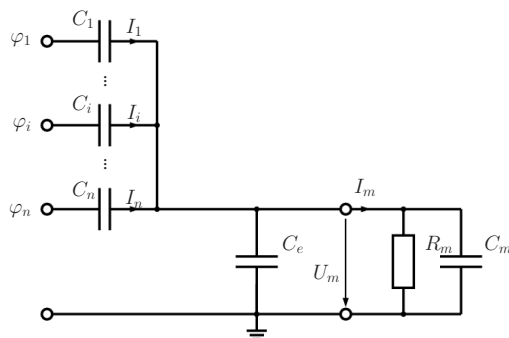


Abb. 2: Modell der kapazitiven Einkopplung

In Abb. 2 ist das mathematische Modell der Signaleinkopplung eines mit R_m und C_m belasteten Sensors dargestellt. Für die am Sensor gemessene Spannung ergibt sich für die durch den Lichtbogen vorgegebenen Teilpotentiale φ_i :

$$U_m = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \varphi_i}{C_m + \sum_{i=1}^n C_i - \frac{j}{R_m \omega}}$$

Um anhand der gemessenen Spannungen mehrerer Sensoren auf die Widerstandsverteilung zurückrechnen zu können, ist es notwendig, dass diejenigen Koppelkapazitäten C_i , die sich auf der direkten Linie vom Sensor zum Lichtbogen ergeben, möglichst hohe Kapazitätswerte aufweisen, während die seitlich angeordneten Koppelkapazitäten möglichst klein sein sollten. Dies kann durch konstruktive Maßnahmen erreicht werden. Um weiterhin einen linearen Frequenzgang der Übertragungsfunktion zu erzielen, ist der Belastungswiderstand R_m entsprechend der Bandbreite des zu messenden Signals möglichst groß zu wählen.

Einfluss von Lichtbogenradius und Lichtbogenposition

Bei kapazitiver Ankopplung, entsprechender Dimensionierung der Feldsonde und Beschaltung des Messabgriffes kann die elektrische Feldstärke auf der Wand des metallischen Hüllrohres am Ort der Feldsonde bestimmt werden [3]. Unter der Annahme, dass ein kurzes Lichtbogenteilstück der Länge Δx als idealer zylinderförmiger Leiter mit dem Radius r_{Libo} angenommen werden kann, ergibt sich für die gemessene Feldstärke analog zur Anordnung eines Zylinderkondensators:

$$E_0 \propto \frac{\varphi}{\ln \left(\frac{r_0}{r_{Libo}} \right) * r_0}$$

Wobei φ das Potential des Lichtbogenteilstücks und r_0 der Radius des Hüllrohres sind. Offensichtlich kann bei Kenntnis von r_0 und E_0 weder φ noch r_{Libo} bestimmt werden. Die Annahme eines festen Wertes für r_{Libo} ist nicht möglich, da dieser in Abhängigkeit der Kühlung und des Stromes erheblich schwankt. Mit Hilfe einer zweiten, am gleichen Lichtbogenteilstück montierten Feldsonde im Abstand r_1 ungleich r_0 ergibt sich ein analoger Zusammenhang für die Feldstärke E_1 .

Somit sind beide Unbekannten (φ und r_{Libo}) bestimmbar. Die bei dieser Methode angenommene Achsensymmetrie tritt im realen Experiment nicht auf. Die Lichtbogenteilstücke werden sich innerhalb der Kunststoffdüse aus der Rotationsachse der Anordnung heraus bewegen. Somit sind auch r_0 und r_1 unbekannt. Um dennoch Position, Dicke und Potential des Lichtbogens bestimmen zu können, wird die Anzahl der Feldsonden erhöht und diese werden um das Lichtbogenteilstück platziert. So ergibt sich z.B. bei insgesamt vier gewählten Feldsonden ein lösbares Gleichungssystem.

Resultate

In einem ersten Ansatz werden vier kapazitiv gekoppelte Sensoren rund um einen innerhalb einer Isolierstoffdüse brennenden Lichtbogen angeordnet. Die Anordnung der Sensoren zeigt Abb. 3. Hierbei handelt es sich um drei identisch aufgebaute Sensoren, die jeweils um 120° versetzt angeordnet sind (S1-S3), sowie einen nach hinten versetzten Sensor (S4).

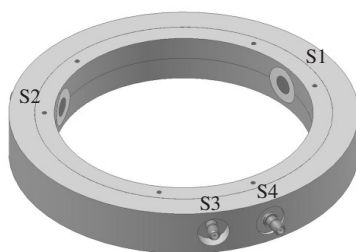


Abb. 3: Sensoranordnung

Die Machbarkeit der Messmethode kann durch experimentelle Messungen bestätigt werden. Exemplarisch sind in Abb. 4 die an den Sensoren S3 und S4 gemessenen Spannungen für einen unbeblasenen, durch einen 950 Hz Schwingkreis gespeisten Lichtbogen dargestellt.

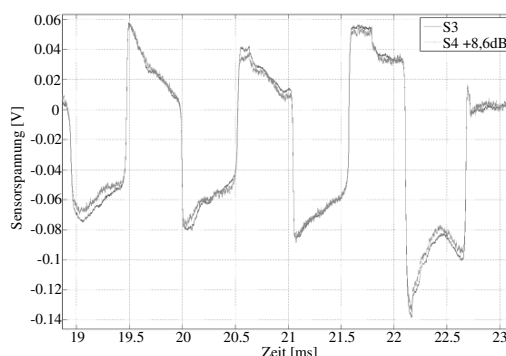


Abb. 4: Gemessene Sensorspannungen

Hierbei ist das Signal von Sensor S4 um 8,6 dB verstärkt worden um einen qualitativen Vergleich beider Spannungen zu ermöglichen. Abweichungen der Spannungsverläufe voneinander können durch einen variierenden Lichtbogenradius bzw. variierende Lichtbogenposition erklärt werden.

Ausblick

Da die prinzipielle Machbarkeit der Messmethode gezeigt werden kann werden im nächsten Schritt mehrere Sensorgruppen bestehend aus jeweils 4 Sensoren entlang der Lichtbogenachse verteilt. Zur Auswertung der experimentell ermittelten Daten wird eine Software erstellt, welche die örtliche Widerstandsverteilung aus diesen Daten ermittelt. Hierbei wird auf die Theorie inverser Probleme zurückgegriffen.

Dieses Projekt wird durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

Quellen

- [1] Knobloch, H., Habedank, U.: *Behaviour of SF6 high-voltage circuit breakers with different arc-extinguishing systems at shortline fault switching*; In: Science, Measurement and Technology; IEE Proceedings; Bd. 148 273–279; 2001
- [2] Tang, M.C.: *Widerstandsverteilung in Schaltlichtbögen von Selbstblasleistungschaltern während der Stromnulldurchgangphase*; Dissertation, Institut für Hochspannungstechnik; RWTH Aachen; 2010
- [3] Andreas Küchler: *Erfassung transienter elektromagnetischer Feldverteilungen mit konzentrierten und räumlich ausgedehnten Sensoren*; Fortschritt-Berichte VDI; Reihe 21: 7; Düsseldorf; 1986

Kontakt

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

Technische Anforderungen für Leistungsschalter in zukünftigen DC-Netzen

Für den sicheren Betrieb zukünftiger Gleichstrom (DC)-Netze werden Leistungsschalter benötigt, die in der Lage sind, Betriebsströme zu schalten und Fehlerströme zuverlässig zu unterbrechen. Auf Grund ihres Funktionsprinzips als sog. 'Nullpunktlöscher' sind gängige Wechselstrom-Leistungsschalter für diese Zwecke nicht geeignet, sodass spezielle DC-Leistungsschalter entwickelt werden müssen. Hierzu ist es zunächst erforderlich, die technischen Anforderungen mit Hilfe von Simulationen zu bestimmen. Es zeigt sich, dass Fehlerströme im Gleichstromnetz eine höhere Steilheit aufweisen, als diese in Drehstromsystemen mit vergleichbarer Kurzschlussleistung auftreten. Im Bezug auf das Ausschlussvermögen werden somit im Allgemeinen erhöhte Anforderungen an DC-Leistungsschalter gestellt.

Einleitung

In den Energieversorgungsnetzen der Zukunft wird in zunehmendem Maße die Gleichstrom-Technologie eingesetzt werden. Bereits heute erweist sich die HVDC-Technologie für die Energieübertragung über große Entfernungen oder zur kabelgebundenen Anbindung von Offshore-Windparks an das Höchstspannungsnetz oft als einzig sinnvolle Alternative [1].

In Energieverteilungsnetzen wird der Anteil der dezentralen Erzeugungseinheiten, d. h. insbesondere Photovoltaik- und Windenergieanlagen, die über Umrichtersysteme in das Netz eingebunden werden, weiter zunehmen. Gleichzeitig verändert sich auch die Verbrauchsstruktur hin zu einer Mehrzahl stromrichtergespeister Lasten. Aus diesem Grund kann sich auch auf dem Gebiet der Mittelspannungs-Verteilnetze die Gleichstromtechnik in technischer und ökonomischer Hinsicht als vorteilhaft erweisen [2]. Ein möglicher Anwendungsfall zeigt sich in der Vernetzung eines Offshore-Windparks mit Hilfe eines Mittelspannungs-DC-Netzes, das die Gleichspannungs-Zwischenkreise der Umrichter an den einzelnen Erzeugungseinheiten mit dem zentralen HVDC-Verknüpfungspunkt verbindet [3]. Auf diese Weise lässt sich die 50 Hz-

Wechselrichtung an den Einheiten, die Transformation des 50 Hz-Stromes und dessen anschließende Gleichrichtung zur Anbindung per HVDC vermeiden.

Für den Betrieb und den Schutz dieser Netze sind entsprechende Schaltgeräte in Form von DC-Leistungsschaltern erforderlich, die in der Lage sind, Betriebsströme sicher zu schalten und im Fehlerfall Kurzschlussströme sicher zu unterbrechen. Im Bereich der Mittelspannungs-DC-Technik (MVDC) stehen derartige Leistungsschalter derzeit nicht zur Verfügung. Außerdem können vorhandene Leistungsschalter aus der Wechselstromtechnik, die den Strom in seinem natürlichen Stromnulldurchgang unterbrechen, für den DC-Bereich nicht eingesetzt werden, da im Gleichstrom kein derartiger Nulldurchgang auftritt.

Um die benötigten DC-Leistungsschalter zielgerichtet entwickeln zu können, müssen zunächst die technischen Anforderungen, die zukünftige DC-Netze an Schaltgeräte stellen, identifiziert werden.

Modell eines MVDC-Netzes

Die technischen Anforderungen lassen sich aus simulativen Untersuchungen zum Einsatz eines DC-Leistungsschalters in einem Modellnetz ableiten. Das hierzu verwendete bipolare MVDC-Netz basiert auf der

Anwendung in einem Offshore-Windpark und ist in Abb. 1 einpolig dargestellt. Es besitzt eine beispielhafte Nennspannung von $\pm 7,5 \text{ kV}$ und dient zur Anbindung der einzelnen Windenergieanlagen (WEA) mit einer Nennleistung von je 5 MVA an eine zentrale Umrichterplattform (DC/DC) zur Einspeisung der elektrischen Energie in das Übertragungsnetz mit Hilfe einer HVDC-Verbindung.

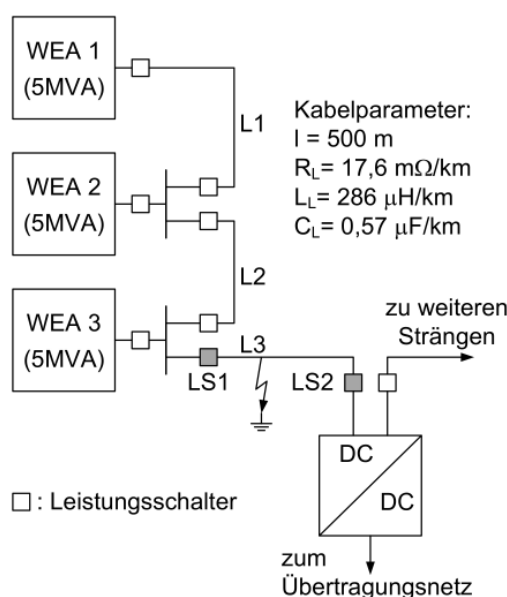


Abb. 1: Modell des DC-Netzes für einen Offshore-Windpark

Ein möglicher Fehlerfall im DC-Netzmodell ist durch einen Erdschluss auf der Leitung L3 gegeben, bei dem die Leistungsschalter LS1 und LS2 als Schutz Einrichtung für die Abschaltung des Fehlerstroms verantwortlich sind. Technisch lassen sich diese Schalter prinzipiell auf verschiedene Arten realisieren, wobei sich neben allgemeinen Anforderungen je nach Schaltertopologie noch weitere besondere Kenngrößen ergeben können. Exemplarisch wird hier mit dem Snubbed Mechanical Circuit Breaker (SMCB) ein sogenannter hybrider Schalter untersucht, in dem ein mechanisches Schaltelement mit leistungselektronischen Bauteilen und passiven Komponenten kombiniert wird.

Der SMCB, dessen prinzipieller Aufbau in Abb. 2 dargestellt ist, zeichnet sich insbesondere durch die einfache Ansteuerung und die Verwendung kostengünstiger Thyristoren anstelle von aktiv-abschaltbaren Halbleiter-Bauteilen, wie z.B. IGBTs aus [4]. Im Normalbetrieb trägt der Pfad des mechanischen Schalters auf Grund seiner geringen Verluste den Betriebsstrom. Zur Abschaltung des Stroms werden zeitgleich mit dem Öffnen der mechanischen Schaltkontakte die antiparallelen Thyristoren gezündet, sodass der Strom auf den ersten Parallelpfad kommutiert und den Kondensator auflädt. Übersteigt dessen Ladespannung die treibende Netzspannung, kann dadurch ein negatives di/dt über den Induktivitäten im Stromkreis (insbesondere den Längsinduktivitäten der Kabel) erzeugt, und schließlich der Strom unterbrochen werden. Der Varistor, dessen Ansprechspannung über der Nennspannung des Netzes liegt, begrenzt die maximale Ladespannung des Kondensators.

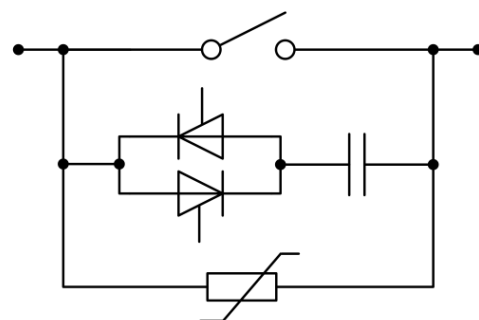


Abb. 2: Aufbau des Snubbed Mechanical Circuit Breakers (SMCB)

Exemplarische Ergebnisse

Die folgenden exemplarischen Ergebnisse auf Basis des Einsatzes eines SMCB zur Unterbrechung eines idealen Erdschlusses im Modellnetz beinhalten technische Kenngrößen, die beispielhaft die Anforderungen an einen Leistungsschalter in einem MVDC-Netz widerspiegeln.

Vor Eintritt des Fehlers bei $t=0 \text{ s}$ be-

trägt der Betriebsstrom 1000 A. Die resultierenden Verläufe des Stroms durch den Schalter LS1 sowie die Spannung über dem Leistungsschalter und die Netzspannung sind in Abb. 3 dargestellt.

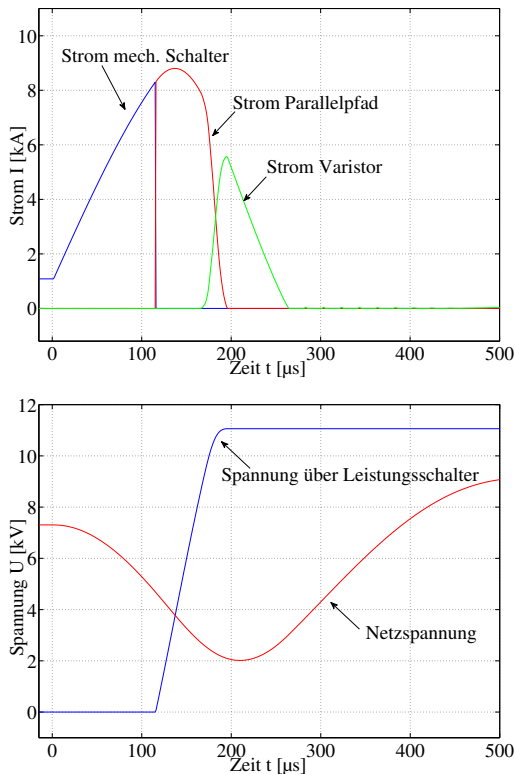


Abb. 3: Verlauf von Strom und Spannung während der Erdschlussabschaltung

Der Strom steigt unmittelbar nach Fehlereintritt mit einer Steilheit von bis zu $75,4 \text{ A}/\mu\text{s}$ und erreicht nach $18,5 \mu\text{s}$ den Detektionswert von 2 kA. Es wird dabei angenommen, dass die Verzögerung des Schalters nach Detektion des Fehlers insgesamt weitere $100 \mu\text{s}$ beträgt. Nach dem Öffnen der mechanischen Schaltkontakte kommutiert der Strom in den Parallelpfad und erreicht einen Maximalwert von 8,8 kA zum Zeitpunkt $t = 140 \mu\text{s}$, bei dem die Ladespannung des Kondensators U_C die treibende Netzspannung überschreitet. Im weiteren Verlauf steigt die Spannung U_C weiter an und wird durch das Ansprechen des Varistors nach $170 \mu\text{s}$ auf 11 kV begrenzt. Der Strom kommutiert da-

bei in den Pfad des Varistors. Der gesamte Abschaltvorgang des Erdschlusses ist bei den gewählten Netz- und Schalterparametern nach $270 \mu\text{s}$ abgeschlossen. Die Netzspannung, die während des Fehlers auf bis zu 2,0 kV einbricht, schwingt nach erfolgreicher Trennung des fehlerbehafteten Netzabschnitts auf die Nennspannung von 7,5 kV ein. Da der Strom unmittelbar nach der Trennung der mechanischen Schaltkontakte kommutiert und zur Aufladung des Kondensators führt, bewirkt die steigende Ladespannung U_C zwangsläufig eine dielektrische Belastung der Schaltstrecke. Diese tritt bereits unmittelbar nach der Kommutierung auf und muss durch eine ausreichende dielektrische Festigkeit der Schaltstrecke beherrscht werden, um einen Durchschlag und damit ein Versagen des gesamten Schalters zu vermeiden. Da die mechanischen Kontakte sich während des Auftretens der dielektrischen Belastung noch in der Öffnungsbewegung befinden und den maximalen Kontakthub noch nicht erreicht haben, kann bereits eine Spannung die mit einer Steilheit kleiner $1 \text{ kV}/\mu\text{s}$ zwischen den Kontakten ansteigt, zu einem derartigen Versagen führen [5]. Daher muss die Anstiegsrate durch eine ausreichende Dimensionierung der Kapazität begrenzt werden.

Die im Netz in Form von magnetischer Energie gespeicherte Energie

$$W_{\text{mag}} = \frac{1}{2} \cdot L_{\text{Netz}} \cdot I_{\text{max}}^2$$

wird während des Abschaltvorgangs vom Schalter kompensiert. Dies geschieht zum einen durch die Aufladung des Kondensators und zum anderen durch die Umsetzung in ohmsche Verluste im Varistor. Die maximal zu absorbierende Energie muss daher ebenfalls bei der Entwicklung eines DC-Leistungsschalters berücksichtigt werden.

Zusammenfassung u. Ausblick

Das Fehlerverhalten des DC-Netzes und die entsprechenden elektrischen Belastungen für Leistungsschalter während der Fehlerstromunterbrechung unterscheiden sich grundlegend von bekannten AC-Netzen. Nicht nur die fehlenden natürlichen Stromnulldurchgänge, sondern vor allem die hohe Anstiegsrate, mit der der DC-Fehlerstrom ansteigt, stellen hohe Anforderungen an das Ausschaltvermögen eines DC-Leistungsschalters. Die aus Wechselspannungssystemen bekannte Transiente Wiederkehrende Spannung (TRV) tritt im DC-Fall nicht auf. Vielmehr wird während des Ausschaltvorgangs im Schalter eine Gegenspannung zur Demagnetisierung der Netzinduktivitäten aufgebaut, die während und nach der Stromunterbrechung für die dielektrische Belastung der Schaltstrecke im DC-Leistungsschalter sorgt. Zusätzlich muss der DC-Schalter in der Lage sein, die vor der Stromunterbrechung im Netz gespeicherte magnetische Energie zu kompensieren. Aus den Untersuchungen kann des Weiteren abgeleitet werden, dass auch an die Schutztechnik in zukünftigen DC-Netzen erhöhte Anforderungen gestellt werden. Dies trifft insbesondere im Hinblick auf die Geschwindigkeit der Detektion und der Signalverarbeitung zu, die im Rahmen dieser Untersuchung zu 100 μ s angenommen ist. Die abgeleiteten technischen Anforderungen für DC-Leistungsschalter werden als Grundlage für die Entwicklung eines derartigen Schalters für MVDC-Anwendungen genutzt. Hierzu werden zunächst neben dem hier betrachteten SMCB weitere Konzepte, die einen Vakuumschalter als mechanisches Schaltelement nutzen, evaluiert und danach die am besten geeignete Topologie für den Aufbau eines Prototyps ausgewählt. Dabei wird unter anderem untersucht, welche zusätzlichen dielektrischen Belastungen für das DC-Netz durch einen Stromabriss in der Vakuumschaltkammer auftreten können.

Die Ergebnisse dieser Voruntersuchungen werden darüber hinaus genutzt, um die benötigten Prüfkreise mit den entsprechenden Kenngrößen für Entwicklungstest des DC-Leistungsschalters aufzubauen.

Quellen

- [1] Kirby, N. et al: *HVDC transmission for large offshore wind farms*, IEE Power Engineering Journal, Vol 16, pp.153-141,2002
- [2] Larruskain, D. et al: *Transmission and Distribution Networks: AC versus DC*, 9th Spanish-Portuguese Congress on Electrical engineering, Marbella, Spain, 2005
- [3] Martander, O.: *Wind Farm Configuration and Energy Efficiency Studies - Series DC versus AC Layouts*, Chalmers University Göteborg, Dissertation, 2006
- [4] Meyer, C.: *Key Components for Future Offshore DC Grids*, RWTH Aachen University, Aachener Beiträge des ISEA Band 46, Dissertation, 2007
- [5] Holaus, W.: *Ultra fast switches-Basic elements for future medium voltage switchgear*, Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH), Dissertation, 2001

Kontakt

Dipl.-Ing. Daniel Eichhoff
eichhoff@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-97348

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

Prototyp zur Ultraschall-Detektion von Ablösungen bei Energiekabeln

Bei der Kabelherstellung beruhen viele Produktionsparameter auf jahrelanger Erfahrung und sind für jeden Kabeltyp optimiert. Während des kombinierten Extrusionsprozesses des Kabelmantels besteht das Risiko, dass zwischen dem Aluminiumschirm und der darauf extrudierten äußeren Ummantelung aus Polyethylen luftgefüllte Bereiche entstehen. In solche Hohlräume kann Wasser eindringen, welches zur Korrosion des Aluminiumschirmes führt. Dieser Vorgang kann die Lebenserwartung eines Energiekabels verkürzen. Mit Hilfe von Ultraschalldiagnoseverfahren ist es möglich, derartige Delaminationen zu identifizieren und deren Position zu lokalisieren.

Delaminationen in Energiekabeln

Im letzten Produktionsschritt eines Hochspannungsenergiekabels erfolgt die Schirmung. Bei einer möglichen Variante wird dazu ein Aluminiumblech um die Kabelader gebogen und an den Stoßkanten verschweißt.

Dieser Schirm muss im Fehlerfall den Kurzschlussstrom tragen und verhindert außerdem das Eindringen von Wasser in das Kabel, wodurch es sonst zur chemischen Zersetzung des Isolationsmaterials kommen kann.

Nach dem Verschweißen wird der Schirm in den Extruder geführt, wo zuerst ein dünner Kleberfilm aufgetragen wird. Anschließend wird der Polyethylenmantel aufextrudiert. Während dieses Extrusionsprozesses kann es zu Ablösungen zwischen dem Aluminiumschirm und dem Polyethylenmantel kommen. In derartige Hohlräume kann Wasser eindringen und der Schirm korrodiert. Durch eine verringerte Querschnittsfläche kann die Stromtragfähigkeit nachteilig beeinflusst werden. Mit Hilfe von Ultraschall kann eine zerstörungsfreie Überprüfung der Grenzschicht direkt nach der Extrusion durchgeführt werden, um mögliche Fehlstellen und Delaminationen, sowie deren Position, auffinden zu können. Darüber hinaus ist eine Optimierung der Prozessparameter während des laufenden Betriebs möglich.

Theoretische Grundlagen

Eine Schallwelle, die vom Prüfkopf (TD) ausgesandt wird und sich in einem Prüfling ausbreitet, wird an inneren Grenzflächen und an der Materialrückwand reflektiert. Diese Reflektionen werden vom Prüfkopf empfangen (Abb. 1).

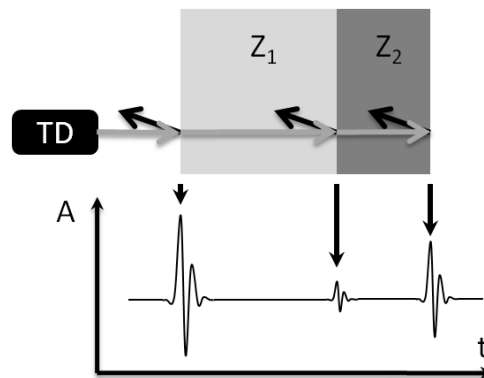


Abb. 1: Oben: Schallausbreitung und Reflektion an inneren Grenzflächen
Unten: Amplitude A des Zeitsignals der reflektierten Impulse

Eine Reflektion von Schallwellen erfolgt grundsätzlich an Grenzflächen zwischen zwei Materialien mit unterschiedlichen spezifischen Schallimpedanzen Z , welche sich aus dem Produkt der Dichte ρ und der Schallgeschwindigkeit c des Materials ergibt:

$$Z = \rho \cdot c$$

Ultraschallwellen verhalten sich an Materialgrenzflächen analog zum mathematischen Modell elektrischer Wellen. Die Reflektions- und Transmissionsfaktoren sind gegeben durch [1]:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad T = \frac{2 Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

wobei $Z_{1,2}$ die spezifischen Schallimpedanzen der jeweiligen Materialien darstellen. Um delaminierte Bereiche des Kabelschirmes zu detektieren, wird das reflektierte Ultraschallsignal analysiert. In Abbildung 2 sind die charakteristischen Signalverläufe für intakte (schwarz) und delaminierte (grau) Bereiche dargestellt. Die Unterscheidung zwischen beiden Signalformen erfolgt durch Korrelation des gemessenen Signals mit einem Referenzsignal.

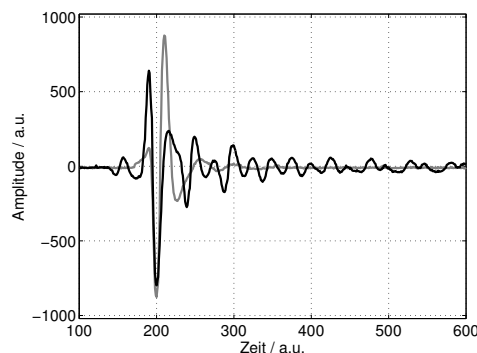


Abb. 2: Signale eines synthetischen Musters, schwarz: intakt, grau: Delamination

Die Unterschiede der Ultraschallsignale können mit Hilfe von Signalkorrelation automatisch nach oder auch während der Messung evaluiert werden. Die Ähnlichkeit von zwei Signalen $s(t)$ und $g(t)$ wird durch die normierte Kreuzkorrelation beschrieben [2]:

$$p_{sg} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} s^*(t) g(t - \tau) dt}{\sqrt{E_s E_g}}$$

Um ein von den entsprechenden Energiegehalten E_s und E_g unabhängiges Ergebnis zu erhalten, wird eine Normierung durch-

geführt. Das Ergebnis p_{sg} liegt zwischen -1 und +1, wobei die größte Übereinstimmung bei +1 vorliegt.

Experimentelle Untersuchungen

Für erste Untersuchungen der Grenzfläche zwischen Aluminiumschirm und Polyethylenmantel wird ein adaptierbarer Prüfaufbau mit einem Ultraschallprüfkopf verwendet. Dieser Aufbau dient zur Verifikation der Detektierbarkeit von Gaseinschlüssen und Delaminationen an Grenzflächen im speziellen Fall von Kabelschirmen.

Abbildung 3 zeigt den Prüfaufbau mit einem Schirmprüfling. Der Ultraschallprüfkopf wird von einer speziellen Halterung aufgenommen, welche gleichzeitig ein Wasserreservoir für die Kopplung des Ultraschalls in den Prüfling bereitstellt. Für die Bewegung des Prüflings und des Prüfkopfes wird ein Mikropositionierungssystem verwendet.

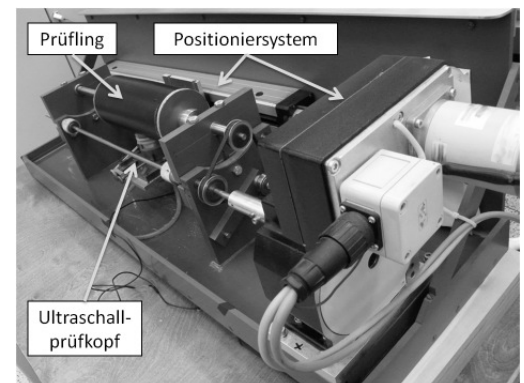


Abb. 3: Experimenteller Prüfaufbau

Die Aufnahme von Messdaten erfolgt während der Prüfung am Prüfling entlang bewegt wird. Am Ende jeder Zeile wird der Prüfling gedreht. Durch die Kombination der Ultraschallmessdaten und der Positionsinformation ist es möglich, Fehlstellen an der Grenzfläche zwischen Aluminiumschirm und Polyethylenmantel innerhalb des Prüflings zu lokalisieren. Die Messdaten, die während des Scanvorgangs gesammelt werden, werden für wei-

tere Untersuchungen der Schalleigenschaften des Schirmmaterials, Nachbearbeitung und Analysen sowie zur Entwicklung eines Detektionsalgorithmus gespeichert. Abbildung 4 zeigt einen K-Scan [3], eine zweidimensionale Darstellung der Korrelationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Position. Schwarze Bereiche repräsentieren eine intakte Grenzfläche. Bereiche, in denen das gemessene Signal vom Referenzsignal abweicht, werden weiß markiert.

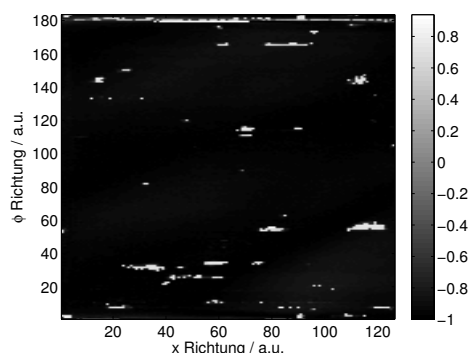


Abb. 4: Scan eines synthetischen Musters, schwarz: intakt, weiß: Delamination

Industrieller Prototyp

Der entwickelte Prototyp ist ein adaptives Messsystem, welches in die Produktionslinie integriert wird, ohne den Produktionsprozess zu verändern (Abb. 5).

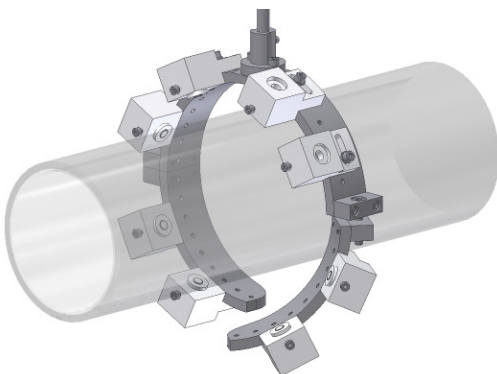


Abb. 5: Mehrprüfkopf-anordnung

Das Messverfahren arbeitet kontaktlos, sodass eine zerstörungsfreie Überprüfung des extrudierten Kabelmantels möglich ist.

Durch eine Mehrkopfanordnung wird das Auflösungsvermögen über den Mantelumfang verbessert. Durch die Verbindung der gemessenen Daten und der entsprechenden Längsinformation des Kabels können die delaminierten Bereiche aufgefunden werden. Die automatische Datenauswertung und Online-Evaluierung ermöglicht eine direkte Mensch-Maschine-Interaktion, beispielsweise die Ausgabe von Warnmeldungen. Dadurch können gezielt Produktionsparameter optimiert und eine konstant hohe Produktionsqualität gewährleistet werden.

Danksagung

Besonderer Dank gilt NEXANS Charle-roi/Calais für die gute Kooperation und die Bereitstellung der Mantelprüfkörper.

Literatur

- [1] *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*, J. Krautkrämer, H. Krautkrämer, Springer 1986
- [2] *Signalübertragung*, J. R. Ohm, H. D. Lüke, Springer 2004
- [3] *Detektion und Evaluation von Inhomogenitäten im Volumen und an inneren Grenzflächen in polymeren Isoliersystemen mittels Ultraschall*, P. Walter, Dissertation IFHT, Aachen 2006

Kontakt

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

Dipl.-Ing. Jens Knael
knael@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-97346

Entwicklung und Aufbau eines Versuchstandes zur Charakterisierung des Verhaltens von Batterien in Hochspannungsspeichersystemen

Batteriespeichersysteme sind in der Lage die volatile Einspeisung von Energiequellen wie Wind oder Solar zu kompensieren. Eine mögliche Topologie für Mittelspannungsnetze stellen Hochspannungsbatterien dar. Dies kann in einer Verbesserung der Effizienz des Systems resultieren. Zudem könnten Hochspannungsbatterien Vorteile in zukünftigen DC-Netzen aufweisen. Allerdings macht die kaum vorhandene Erfahrung mit der Serienverschaltung von Batterien Summen-Betriebsspannungen bis zu einigen Kilovolt Untersuchungen zum Lade- und Entladeverhalten solcher Systeme notwendig. Aus diesem Grund wurde ein Versuchstand für Hochspannungsbatterien zur Analyse dieser Prozesse an verschiedenen Batteriespeichertechnologien aufgebaut.

Einleitung

Der starke Anstieg der Energiebereitstellung auf der Basis volatiler Energiequellen führt zu neuen Herausforderungen in Design, Planung und Betrieb von Energiesystemen. Zusätzlich steigt der Bedarf an Regelreserven und Netzdienstleistungen. Dies zwingt Netzbetreiber den Einsatz von Flexibilisierungsmaßnahmen und unkonventionellen Konzepten zu intensivieren. An dieser Stelle können Batteriespeichersysteme einzigartige und skalierbare Lösungen für die Energieversorgung in der Größenordnung von einigen 100 MWh mit Anschlussleistungen im Bereich von 100 MW bieten.

Eine naheliegende Möglichkeit, diese Leistungsklassen zu erzielen, liegt in Hochspannungsbatteriespeichersystemen. Große Batteriespeichersysteme weisen eine hohe Betriebssicherheit und Stabilität auf. Somit bietet sich der Einsatz in Hochspannungsanwendungen an [1]. Trotzdem führt die Serienverschaltung von Batterien mit Summen-Betriebsspannungen bis zu einigen Kilovolt zu nicht trivialen Lade- und Entladecharakteristika solcher Systeme. Um die Spannungsverteilung über den Zellen untersuchen zu können, wurde ein

Hochspannungsbatterieprüfstand realisiert. Abb. 1 zeigt das Konzept des Prüfstandes.

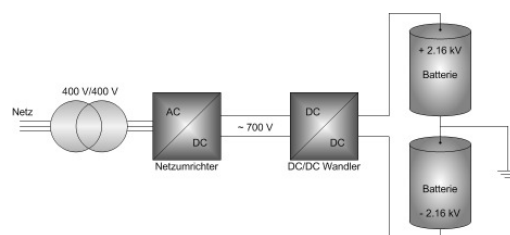


Fig. 1: Prinzip des Prüfstandes

Der Prüfstand besteht aus einem Trenntransformator mit Anschluss an das Niederspannungsnetz, einem Umrichter, einem DC/DC Wandler als Lade- und Entladeeinrichtung und dem Hochspannungsspeichersystem. Die Leistung der Leistungselektronik und des Netzanschlusses liegt in der Größenordnung von 100 kVA. In der Grundkonfiguration besteht das Speichersystem aus 360 Bleigelakkus (12 V / Block) in Serie.

Leistungselektronik

Der klassische 2-Level hard-switched Umrichter ist Stand der Technik für Niederspannungsanwendungen. Er stellt die in der Industrie meist genutzte Topologie dar. Anders als im Einsatz für Antriebe wird für

die Einspeisung von Leistung in das Netz eine höhere DC-Link Spannung benötigt. Die Schaltfrequenz des Umrichters beträgt 3 kHz. Zur Einhaltung der erforderlichen Netzkennzahlen wird ein LCL Ausgangsfilter und eine Stromregelung, welche in der Lage ist die Harmonischen geringer Ordnung zu kompensieren, genutzt.

Der DC/DC Wandler, eine Dual-Active Bridge Topologie, agiert als Lade- und Entladeeinrichtung für die Hochspannungsbatterie. Im Prüfstand wird ein weites Spektrum an Betriebspunkten benötigt. Abhängig vom Ladezustand der Batterien variiert die Spannung zwischen 3,3 kV und 6 kV. Die Lade- bzw. Entladeleistung bewegt sich zwischen 4 kW und 100 kW. Der Betrieb bei niedriger Leistung wird benötigt, um die Spannungsverteilung über der Serienschaltung der Batterien zu untersuchen. Aus diesem Grund ist der DC/DC Wandler für den gesamten Betriebsbereich optimiert. Die Ausgangsspannung wird durch den Netzumrichter konstant zu 750 V geregelt. Somit ist eine hohe Spannungstransformation von der Ausgangs- zur Eingangsseite notwendig. Aus diesem Grund wird eine galvanisch getrennte Topologie verwendet, um zusätzlich das Übertragungsverhältnis des integrierten Transformators zu nutzen.

Hochspannungsbatteriespeicher

Das Batteriespeichersystem besteht aus einer hohen Anzahl von in Serie verschalteten Batterien. Somit stellen die optimale Topologie und die Funktionssicherheit zentrale Fragen dar. Bleigel Akkus sind robust und kostengünstig im Vergleich zu anderen Technologien. Der Prüfstand wird mit 360 12 V Bleigel Akkus mit einer Kapazität von jeweils 27 Ah realisiert. Der Prüfstand kann somit ca. 120 kWh Energie speichern.

Die Topologie des Prüfstandes besteht im Ganzen aus sechs Batterieblöcken mit jeweils 720 V. Somit ergibt sich die Nennspannung zu ± 2160 V. Im Falle ma-

ximal geladener Batterien beträgt die Spannung des Speichersystems inklusive der Spannungsabfälle über den Kabeln, Sicherungen und Trennern ± 3 kV. Abb. 2 zeigt den Aufbau des Batteriespeichersystems. Jeder Batterieblock besteht aus zehn Untersträngen von jeweils 72 V. Das gesamte Batteriespeichersystem ist in zwei Regale mit je drei Batterieblöcken unterteilt. Dieses Design wurde zur Optimierung der Kabellängen und somit der Reduktion des inneren Widerstandes der Hochspannungsbatterie gewählt.



Fig. 2: Batteriespeichersystem

Das Batteriemonitoringsystem besteht aus 360 LEM Sentinel Sensoren. Diese messen für jede Batterie unabhängig Spannung, Temperatur und Impedanz.

Sicherheitsinfrastruktur

Wegen der hohen Spannung und der hohen gespeicherten Energie sind aufwendige Sicherheitsmaßnahmen für den Prüfstand notwendig. Aus diesem Grund wurde eine spezielle Sicherheitsinfrastruktur entwickelt und in das System integriert. Im speziellen Fall des Batteriespeichersystems ist es nicht möglich die hohe Spannung

abzuschalten oder zu erden. Da die maximale DC Berührspannung 120 V beträgt [2], kann die gesamte Hochspannungsbatterie in 72 V Stränge getrennt werden. Um lange Kabelwege zu vermeiden, wurde ein spezielles Trennersystem entwickelt und direkt in das Batterieregal integriert. Abb. 3 zeigt das Prinzip dieses Trenner. Insgesamt sind auf diesem Wege 60 Trenner realisiert.

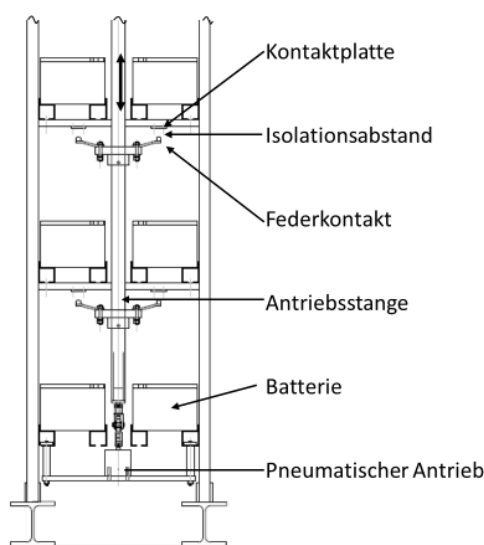


Fig. 3: Trennersystem im Batterieregal

Die Steuerung der Leistungselektronik, das Batteriemonitoring, sowie Türkontakte, Notaus und Feuermelder sind in einem Sicherheitskreis integriert. Somit ist es möglich alle kritischen Zustände zu registrieren und den Prüfstand in einen gesicherten Zustand zu versetzen.

Geplante Untersuchungen

Im vorgestellten Prüfstand ist es möglich das Ladeverhalten von verschiedenen Batterietechnologien in Hochspannungsreihenschaltungen zu untersuchen. Die Effizienz und Betriebssicherheit sind von zentralem Interesse und können im beschriebenen Aufbau analysiert werden. Der Hauptfokus liegt in der Untersuchung der Spannungsverteilung über den Batterien in sol-

chen Serienschaltungen. Der modulare Aufbau des Prüfstandes und weite Bereich an Betriebspunkten der Leistungselektronik erlauben eine Variation verschiedener Parameter, um eine optimale Topologie zu evaluieren. Unter anderem ist es direkt möglich das Spannungslevel des Speichersystems anzupassen oder das Lade- bzw. Entladeverhalten anderer Batterietechnologien zu untersuchen indem einzelne Stränge ausgetauscht werden. Der Einsatz solcher Batteriespeichersysteme im Mittelspannungsnetz erfordert eine hohe Betriebssicherheit des Systems. Aus diesem Grund können durch das Monitoring jeder einzelnen 12 V Batterie mögliche Fehler detailliert analysiert werden. Zusätzlich erlaubt eine mögliche Parallelverschaltung der Batterieblöcke eine Untersuchung der Betriebssicherheit von redundanten Systemen.

Danksagung

Das Projekt ist finanziert von der E.ON AG als Teil der E.ON Forschungsinitiative.

Quellen

- [1] P. A. Taylor, *Update on the Puerto Rico electric power authority's spinning reserve battery system*, Battery Conference on Applications and Advances, 11th Annual, Seiten 249-252, 1996
- [2] VDE 0100-410, *Errichten von Niederspannungsanlagen: Schutzmaßnahmen - Schutz gegen elektrischen Schlag*, VDE Norm, 2007

Kontakt

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

Verhalten von syntaktischem Schaum unter Gleichspannungsbelastung

Gegenstand des vorliegenden Beitrags ist die experimentelle und theoretische Betrachtung des Einflusses von Temperatur und Feldstärke auf die elektrische Leitfähigkeit und Gleichspannungsfestigkeit von syntaktischem Schaum. Als Ergebnis der Untersuchungen kann festgehalten werden, dass für syntaktischen Schaum eine exponentielle Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von Temperatur- und Feldstärkebelastung besteht. Als weiteres Ergebnis kann in einem bestimmten Temperaturbereich ein Anstieg der Spannungsfestigkeit mit steigender Temperatur festgehalten werden. Ab einer spezifischen Grenztemperatur kommt es jedoch wieder zu einer Reduktion der Spannungsfestigkeit.

Einleitung

Syntaktischer Schaum ist ein Verbundwerkstoff aus hohlen Mikropartikeln, sogenannte Mikrohohlkugeln (MHK), und einer Polymermatrix. Auf Grund seiner Struktur weist das Material eine sehr geringe Dichte auf. Im Rahmen dieses Beitrags wird syntaktischer Schaum aus Epoxidharz gefüllt mit Glas-Mikrohohlkugeln verwendet. Mit dem aktuell eingesetzten Produktionsverfahren sind Füllgrade von bis zu 55 Vol.-% Mikrohohlkugeln möglich. Hierdurch wird eine Gewichtsreduktion von 40 % im Vergleich zu reinem Epoxidharz ermöglicht. Syntaktischer Schaum wird bereits in Komponenten der Hochspannungstechnik als Isoliermaterial eingesetzt, bei denen eine kompakte und leichte Bauweise gefordert sind. Abb. 1 zeigt eine Rasterelektronenmikroskop Aufnahme der Materialstruktur. Der Name *syntaktischer Schaum* resultiert aus der schaumartigen Struktur bedingt durch die in die Polymermatrix eingebrachten Mikrohohlkugeln.

Bei Gleichspannungsbeanspruchung eines Isoliersystems teilt sich das elektrische Feld im stationären Zustand nach den beteiligten Leitfähigkeiten der einzelnen Materialien auf. Daher ist bei der Auslegung von Isoliersystemen für Gleichspannungsanwendungen die exakte Kenntnis der elek-

trischen Leitfähigkeit und Durchschlagsfestigkeit jeder Komponente unumgänglich. Bei festen Isolierstoffen, z.B. Epoxidharzen, ist die Leitfähigkeit von der Temperatur und der Feldstärkebelastung abhängig [1, 2, 3]. Weiterhin ist eine Abhängigkeit der Spannungsfestigkeit von der Temperatur bekannt [4]. Gegenstand aktueller Untersuchungen ist die Fragestellung, inwieweit die für die festen Isolierstoffe bekannte Abhängigkeit der Leitfähigkeit und Spannungsfestigkeit von der Temperatur bzw. Feldstärkebelastung für syntaktischen Schaum aus Epoxidharz und Glas-Mikrohohlkugeln ebenfalls gültig ist.

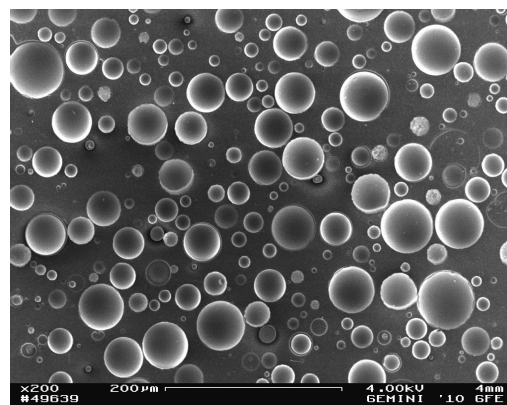


Abb. 1: Syntaktischer Schaum auf Epoxidharzbasis gefüllt mit Glas-MHK

Theoretische Grundlagen

Während ein idealer Isolierstoff nichtleitend ist, kommt es innerhalb eines realen Isolierstoffs durch eine von außen angelegte Spannung zu einer Bewegung von Ladungsträgern [1]. Der reale Isolierstoff besitzt somit eine gewisse Restleitfähigkeit, welche bestimmt werden kann zu [2]:

$$\kappa = \sum (q_i n_i b_i)$$

n = Dichte der Ladungsträger in $1/\text{cm}^3$
 q = Ladung der Träger in As
 b = Beweglichkeit der Träger in cm^2/Vs

Unter der Annahme, dass die Ladung q konstant ist, ergibt sich eine Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Dichte der Ladungsträger n sowie deren Beweglichkeit b . Dem Van't Hoffschen Gesetz folgend, ergibt sich in bestimmten Feldstärke- und Temperaturbereichen die Beziehung [2]:

$$n \cdot b \sim \exp(-F/kT)$$

k = Boltzmannkonstante
 F = thermische Aktivierungsenergie
 T = Temperatur

Es besteht somit ein direkter Zusammenhang zwischen dem Produkt $n \cdot b$ und der Temperatur. Dieser ist messtechnisch festzustellen. Neben der Temperatur hat auch eine im Isolierstoff vorherrschende Feldstärke Einfluss, sowohl auf die Dichte, als auch auf die Beweglichkeit der freien Ladungsträger. Dies ist auf den sogenannten Schottky-Effekt zurück zu führen, welcher beschreibt, dass die notwendige thermische Aktivierungsenergie F für die Bereitstellung eines freien Elektrons aus dem Isoliermaterial oder der Kathode bei hohen Feldstärken E auf den effektiven Wert F_{eff} reduziert wird [2]:

$$F_{eff} = F - \sqrt{\frac{e^3 E}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}}$$

e = Elementarladung
 ϵ_0 = Diel.-Konst. des Vakuums
 ϵ_r = Dielektrizitätszahl des Dielektrikums

Bei konstanter Umgebungstemperatur T stehen mit steigender Feldstärke E zunehmend mehr freie Elektronen zum Ladungstransport zur Verfügung. Des Weiteren wird die Beweglichkeit der Elektronen aufgrund des Feldstärkeinflusses gesteigert. Es steigen also sowohl die Dichte der freien Ladungsträger n als auch die Beweglichkeit b . Damit ergibt sich nach der Gleichung für die Restleitfähigkeit eine mit steigender Feldstärke E zunehmende Leitfähigkeit. Für die elektrische Leitfähigkeit von Polymeren kann in einem begrenzten Temperatur- und Feldstärkebereich folgende Näherung verwendet werden [6, 1]:

$$\kappa(T, E) = \kappa_0 \cdot e^{\alpha T} \cdot e^{\beta E}$$

Beispiele für typische Isolierstoffe sind [6]:
 α im Bereich $0,074 - 0,114 \text{ K}^{-1}$ und β im Bereich $0,018 - 0,128 \text{ mm / kV}$.

Die Gleichspannungsfestigkeit von Polymeren ist ebenfalls eine Funktion der Temperatur [4]. Dabei wird zwischen Temperaturen unterhalb und oberhalb der Glasumwandlungstemperatur T_G der Polymere unterschieden. Während die Durchschlagsfestigkeit unterhalb T_G noch relativ flach mit der Temperatur abfällt, kommt es oberhalb von T_G zu einem steileren Abfall.

Materialherstellung und Probengeometrie

Im Rahmen dieser Untersuchung wird ein heißhärtendes Epoxidharzsystem mit einer Glasumwandlungstemperatur von $130 - 140^\circ\text{C}$ als Matrixmaterial verwendet. Dieses ist zu 55 Vol.-% mit Mikrohohlkugeln aus Glas gefüllt. Die Mikrohohlkugeln haben einen mittleren Durchmesser kleiner $100 \mu\text{m}$. Für die Leitfähigkeitsmessungen werden 3 mm dicke Plattenprüflin-

ge verwendet. Für die Durchschlagsversuche werden Prüflinge in Kugel-Kugel-Elektrodengeometrie hergestellt mit einem Elektrodendurchmesser von 12 mm und einer Schlagweite von 3 mm. Um auch die Spannungsfestigkeit bei der Glasumwandlungstemperatur untersuchen zu können, wird für die Durchschlagsuntersuchungen ein anderes Harzsystem mit einer niedrigeren Glasumwandlungstemperatur von 100-110 °C verwendet.

Versuchsaufbau und -durchführung

Der Versuchsaufbau für die Leitfähigkeitsmessungen erfolgt nach DIN VDE 0303-30 (Abb. 2).

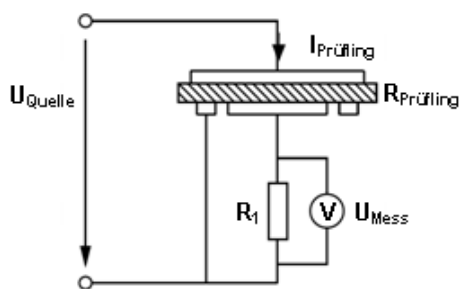


Abb. 2: Aufbau nach DIN VDE 0303-30

Es wird eine Schutzringanordnung verwendet, um Durchgangsstrom und Oberflächenstrom separat voneinander messen zu können. Ein Hochspannungserzeuger mit einer maximalen Ausgangsspannung von 100 kV liefert die nötige Gleichspannung. Da die Leitfähigkeit ebenfalls als Funktion der Temperatur bestimmt werden soll, befindet sich der gesamte Aufbau in einem Temperaturschrank. Zur Bestimmung der Feldstärkeabhängigkeit werden Spannungen bis zu 50 kV an die Prüflinge angelegt. Die Temperatur während der Messungen beträgt 20 °C. Zur Messung der Temperaturabhängigkeit wird die Temperatur im Bereich zwischen 20 °C und 100 °C variiert. Die Spannungsbelastung beträgt hier 1 kV.

Der Versuchsstand zur Bestimmung der Spannungsfestigkeit von syntaktischem Schaum unter Gleichspannungsbelastung wird nach DIN VDE 0303-21 und 0303-22 aufgebaut. Der Prüfling befindet sich zur Vermeidung von Gleitentladungen und zur Erzeugung der benötigten Prüftemperatur in einem temperaturgeregelten Mineralölbad. Die Prüflinge werden mit einem Stufentest (Start: 30 kV, Stufenhöhe: 5 kV / 2 min) bis zum Durchschlag belastet.

Experimentelle Ergebnisse

In Abb. 3 ist die Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der elektrischen Feldstärkebelastung im Material dargestellt. Die Kurve zeigt einen exponentiellen Anstieg der Leitfähigkeit mit der Feldstärkebelastung, wie in der Theorie beschrieben wird. Somit kann bestätigt werden, dass auch bei syntaktischem Schaum ein Zusammenhang zwischen der elektrischen Feldstärkebelastung und der Leitfähigkeit besteht.

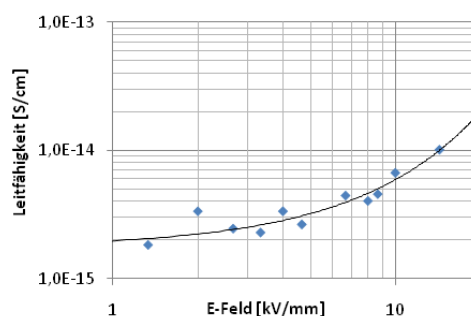


Abb. 3: Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Feldstärke

Abb. 4 zeigt die Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Temperatur. Analog der Leitfähigkeitsmessungen bei unterschiedlichen Feldstärken, ist auch hier ein exponentieller Anstieg der Leitfähigkeit mit steigender Temperatur zu beobachten.

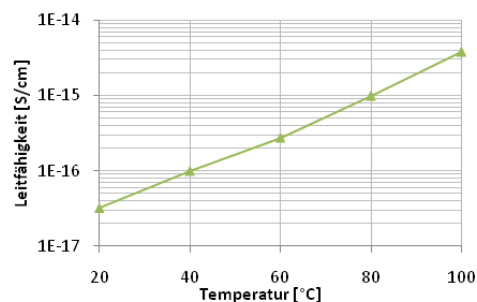


Abb. 4: Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Temperatur

Die Ergebnisse der Durchschlagsversuche sind in Abb. 5 dargestellt. Bis zu einer Temperatur von 85°C steigt die Spannungsfestigkeit. Dieser Effekt kann mit der inneren Feldverteilung im Material erklärt werden. Mit steigender Temperatur steigt die Leitfähigkeit der Epoxidharzbereiche zwischen zwei Mikrohohlkugeln, wodurch es zu einer homogenen Feldverteilung kommt [6]. Bei Temperaturen oberhalb von T_G überwiegt der in der Theorie beschriebene Effekt des Verlustes der Spannungsfestigkeit, und die Spannungsfestigkeit sinkt.

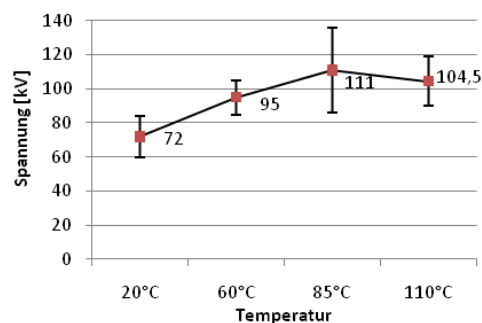


Abb. 5: Spannungsfestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde der Zusammenhang zwischen der Leitfähigkeit und der Temperatur- bzw. Feldstärkebelastung für syntaktischen Schaum bestimmt. Es konnte gezeigt werden, dass eine exponentielle Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Temperatur und Feldstärke besteht. Weiterhin konnte mit-

tels der Untersuchungen eine Anhängigkeit der Gleichspannungsfestigkeit von der Temperatur nachgewiesen werden. Bei zukünftiger Dimensionierung des Materials in Hochspannungsanwendungen müssen diese Zusammenhänge beachtet werden.

Quellen

- [1] Bärsch, Kindersberger: *Nichtlineare dielektrische Funktionseigenschaften von Dielektrika*, ETG-Fachbericht 110. VDE Verlag.
- [2] Beyer, Boeck, Möller, Zaengl: *Hochspannungstechnik*, Springer Verlag, 1986.
- [3] Huber, Weddingen: *Epoxy casting resins with improved electrical conductivity*, Colloid & Polymer Sci. 259, pp.852-858, 1981.
- [4] Artbauer: *Elektrische Festigkeit von Polymeren*, Kolloid-Zeitschrift und Zeitschrift für Polymere, Band 202, Heft 1, pp.15-25, 1964.
- [5] Hampton, Chang, Hobdell: *What happens to materials under HVDC?*, CIGRÉ Session 2000, P2-001.
- [6] Strauchs, Mashkin: *Einfluss von Temperatur und elektrischer Feldstärke auf die elektrische Leitfähigkeit und Spannungsfestigkeit von syntaktischem Schaum*, ETG-Fachbericht 125. VDE Verlag.

Kontakt

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

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

Einsatz von syntaktischem Schaum in supraleitenden Betriebsmitteln

Die Entdeckung der Supraleitung 1911 bedeutete, dass eine verlustfreie, elektrische Energieübertragung prinzipiell möglich ist. Seit 1986 werden Keramiken erforscht, die bei vergleichsweise hohen Temperaturen ihren supraleitenden Zustand erreichen. Da diese Keramiken anstatt mit flüssigem Helium mittels flüssigen Stickstoffs (LN_2), dessen Siedetemperatur bei $T = 77 \text{ K}$ liegt, gekühlt werden können, verringern sich die Betriebskosten eines supraleitenden Betriebsmittels und ein wirtschaftlicher Betrieb ist in speziellen Fällen möglich. Um die Betriebsspannungen gegen Erde zu isolieren, soll ein syntaktischer Schaum, bestehend aus einem mit Mikrohohlkugeln gefüllten Polymer zum Einsatz kommen. Beispielfhaft wird hier auf das supraleitende Energiekabel eingegangen.

Einleitung

Prototypen supraleitender Energiekabel werden im Wesentlichen nach zwei unterschiedlichen Designs gefertigt. Diese sind zum einen die Warm Dielectric (WD) Kabel (s. Abb. 1) und zum anderen die Cold Dielectric (CD) Kabel (s. Abb. 2) [1].

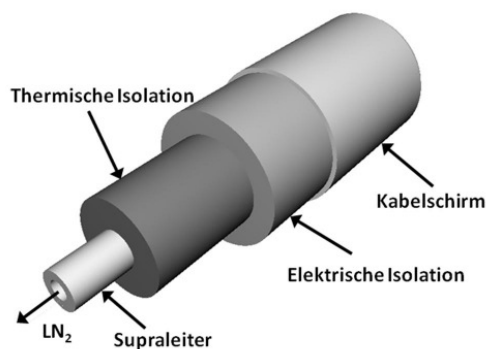


Abb. 1: Schematischer Aufbau eines WD-Kabels

Beide Kabelbauweisen besitzen einen Hohlleiter aus Kupfer auf den Supraleitermaterial aufgebracht ist. Durch den Hohlleiter fließt LN_2 zur Kühlung des Supraleiters auf eine Temperatur von ca. 70 K [2]. Der Unterschied zwischen den beiden Kabeldesigns besteht in der Reihenfolge der thermischen und elektrischen Isolierung. Der Innenleiter des WD-Kabels wird zunächst mittels Vakuumschicht thermisch

isoliert. Da die darauf aufgetragene elektrische Isolierung nun Umgebungstemperatur besitzt, kann auf eine konventionelle Isolierung (z.B. vernetztem Polyethylen) zurückgegriffen werden. Im CD-Kabel hingegen wird der Innenleiter zunächst elektrisch isoliert, ehe eine Vakuumschicht für die thermische Isolation sorgt. Die elektrische Isolierung ist daher tiefkalt (s. Abb. 2).

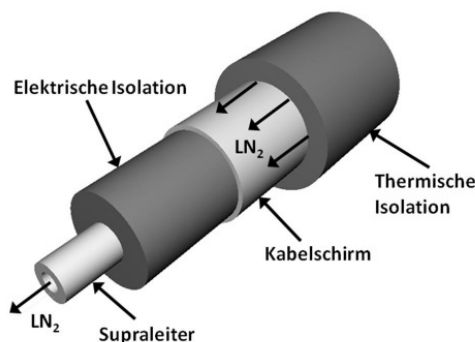


Abb. 2: Schematischer Aufbau eines CD-Kabels

Bisherige Prototypen des CD-Kabeldesigns verwenden als Isolierung polypropylenlaminierter Papiertapes (PPLP) die mit Flüssigstickstoff imprägniert sind. Daher ist es möglich den Aufbau des CD-Kabels soweit zu modifizieren, dass der Innenleiter massiv ausgeführt wird und der Supraleiter durch die Isolierung hindurch gekühlt wird.

Da der Versand von supraleitenden Kabeln nur im warmen Zustand erfolgt, muss bei zuvor stückgeprüften Kabeln das LN_2 zunächst wieder entfernt werden. Dies hat zur Folge, dass die zuvor durchgeführten Stückprüfungen ihre Aussagekraft verlieren. Wird das Kabel nach der Verlegung erneut mit Flüssigstickstoff gefüllt, wird prinzipiell eine neue, ungeprüfte Isolation geschaffen. Abhilfe schafft der Einsatz eines festen Isoliersystems. Dieses würde trotz des Ablassens des Flüssigstickstoffs zwecks Versands bestehen bleiben. Die Aufgabe des festen Isoliersystems soll in im Folgenden vorgestellter syntaktischer Schaum übernehmen.

Syntaktischer Schaum

Allgemein ist syntaktischer Schaum ein Verbundwerkstoff bestehend aus einer Polymermatrix mit eingebetteten Mikrohohlkugeln mit einem mittleren Durchmesser von einigen $10\text{ }\mu\text{m}$. Der Begriff leitet sich aus der schaumartigen Struktur des Materials ab. Abb. 3 zeigt eine Rasterelektronenmikroskopaufnahme eines syntaktischen Schaums aus mit Glas-Mikrohohlkugeln (1) gefülltem Epoxidharz (2).

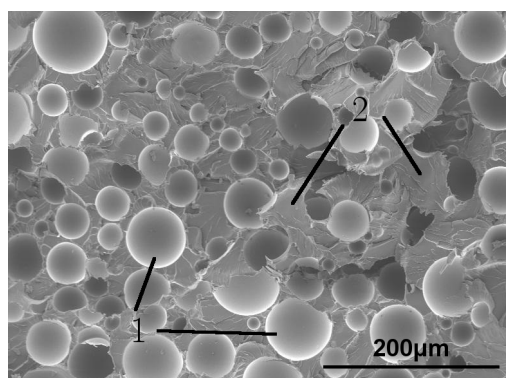


Abb. 3: Elektronenmikroskopbild von syntaktischem Schaum

Durch die Variation verschiedener Herstellungs- bzw. Materialparameter wie z.B. Kugeltyp, Kugelwandstärke, Matrixmaterial oder Füllgrad, können verschiedene Materialeigenschaften gezielt verändert

werden. So wird beispielsweise die Dichte des Schaums durch den Anteil der Mikrohohlkugeln oder die mechanische Festigkeit durch die Größe der Hohlkugeln bestimmt. Die Vorteile eines Einsatzes des syntaktischen Schaums als Feststoffisolation in einem supraleitenden Kabel gegenüber dem eines reinen Polymers sind vielseitig:

1. Der Volumenschwund des Schaums bei Abkühlung ist kleiner im Vergleich zu reinem Material.
2. Durch Variation von Herstellungsparametern wie Füllgrad, Hohlkugelgröße oder Hohlkugelmaterialeigenschaften können Eigenschaften des Schaums gezielt eingestellt werden.
3. Die Dielektrizitätszahl des Schaums ist geringer, woraus eine Kapazitätsminderung und somit ein geringerer Blindleistungsbedarf des Kabels resultiert.
4. Aufgrund der im Vergleich zum Matrixmaterial kostengünstigeren Hohlkugeln sinken die Materialkosten der Isolierung.
5. Die deutlich kleinere Dichte der Hohlkugeln verringert die Dichte des Isoliersystems, so dass das Kabel wesentlich leichter wird. Daher können unter anderem Transportkosten gespart werden.

Anforderungen an den syntaktischen Schaum

In erster Linie soll der zu entwickelnde syntaktische Schaum zur Isolierung des auf Hochspannungspotenzial liegenden supraleitenden Innenleiters gegen Erde eingesetzt werden. Er muss folglich eine ausreichend hohe Spannungsfestigkeit besitzen. Desweiteren sollte sowohl die relative Permittivität ϵ_r als auch der Verlustfaktor $\tan \delta$ möglichst gering sein, um im Gleichspannungsfall die benötigte Ladeenergie des

Kabels zu minimieren und im Wechselspannungsfall eine möglichst geringe Verlustleistung zu erzeugen. Die Verlustleistung, welche in Form von Wärme innerhalb der Isolierung umgesetzt wird, erhöht zugleich den Kühlaufwand des Kabels, der auf Grund der relativ schlechten Wirkungsgrade von Kältemaschinen zu weiteren Verlusten führt. Demzufolge muss die elektrische Leitfähigkeit des Schaums gering sein. Als mechanische Belastungen treten im Kabel Druck- und Zugkräfte infolge von Biegungen auf, die einerseits durch das Aufwickeln der Kabel auf Versandtrommeln als auch durch Kurvenverlegungen auftreten. Zudem werden die Zugkräfte durch den bei der Abkühlung hervorgerufenen Volumenschwund verstärkt. Der Schrumpf des Dielektrikums muss aus diesem Grund gering sein. Im modifizierten CD-Kabeldesign wird der supraleitende Innenleiter durch die elektrische Isolierung hindurch gekühlt. Um sowohl bei Inbetriebnahme, d.h. beim Hinunterkühlen, als auch während des Betriebs des Kabels den Supraleiter unterhalb seiner Sprungtemperatur zu halten, muss der syntaktische Schaum eine ausreichend hohe Wärmeleitfähigkeit besitzen. Sowohl durch Wechselspannung als auch durch Oberschwingungen einer Gleichspannung ist mit Wärmeverlusten von etwa 1 W/m zu rechnen [3], die durch die Isolierung hindurch abgeführt werden muss.

Erste Ergebnisse

Durchschlaguntersuchungen im quasi Homogenfeld (Kugel-Kugel-Anordnung, Schlagweite 2 mm) an syntaktischen Schäumen aus Epoxidharz und Glasmikrohohlkugeln mit einem mittleren Durchmesser von 40 µm zeigen keinen signifikanten Einfluss der Temperatur auf die Durchschlagfeldstärke (Abb. 4). Sowohl bei einem Füllanteil von 30 Vol.-% als auch bei 50 Vol.-% ist kein eindeutiger Trend zu erkennen, wenn die Temperatur des Ma-

terials von Raumtemperatur (RT) auf eine Temperatur von 77 K gesenkt wird.

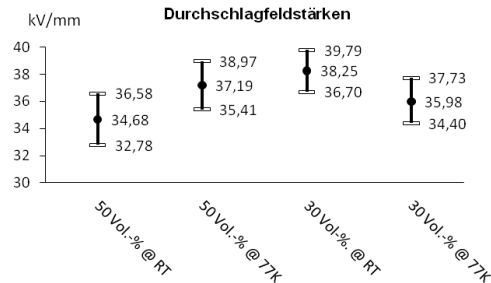


Abb. 4: Durchschlagfeldstärke und Konfidenzintervalle zweier syntaktischer Schäume bei unterschiedlichen Temperaturen

Um fundierte Aussagen über den Einfluss der Temperatur auf die Durchschlagfeldstärke treffen zu können, werden in Zukunft Durchschlaguntersuchungen an weiteren Schaumzusammensetzungen durchgeführt.

Quellen

- [1] A. Bulinski, J. Densley, *High Voltage Insulation for Power Cables Utilizing High Temperature Superconductivity*, IEEE International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, 1998.
- [2] C. Matheus, *Technische und wirtschaftliche Einsatzmöglichkeiten supraleitender Energiekabel*, Dissertation RWTH Aachen, 2005.
- [3] R. Bach, W. Prusseit, *Supraleitung in EVU-Netzen - Konzept für eine effiziente Energieversorgung von Ballungsräumen*, EW Medien und Kongresse GmbH, 2009.

Kontakt

Dipl.-Ing. Daniel Winkel
winkel@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-93033

Generierung synthetischer Nieder- und Mittelspannungsmodellnetze

Infolge einer steigenden Anzahl dezentraler Erzeugungsanlagen sowie neuer Verbraucher-technologien wie etwa Elektrofahrzeugen, erwachsen neue Herausforderungen an Planung und Betrieb elektrischer Verteilungsnetze. Um allgemeingültige Aussagen über die Ausprägung notwendiger Netzausbaumaßnahmen und die dadurch entstehenden Kosten zu erzielen bzw. die Wirksamkeit von neuen Betriebsstrategien für dezentrale Anlagen zu belegen, bedarf es belastbarer, repräsentativer Netzdaten als Berechnungsgrundlage. Im Folgenden werden daher Verfahren vorgestellt, mit denen Modellnetze generiert werden können, die statistisch der Gesamtheit deutscher Netze gleichen und daher ebensolche allgemeingültigen Aussagen zulassen.

Einleitung und Zielsetzung

Zahlreiche Untersuchungen am Institut für Hochspannungstechnik zur Integration von Elektromobilität und dezentralen Erzeugungsanlagen betreffen sowohl die Mittel- als auch die Niederspannungsebene. Auf Grund verschiedener Datengrundlagen und Kenngrößen beider Spannungsebenen - welche sich in rein statistischen Daten für die NS-Ebene und frei verfügbaren Geokoordinaten für die MS-Ebene ausdrücken - wurden unterschiedliche Verfahren für die Synthese von Modellnetzen entwickelt, welche in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden. Eine Kombination der so generierten Mittel- und Niederspannungsmodellnetze ist möglich und erlaubt eine integrierte Betrachtung beider Spannungsebenen in einem Modell. Eine Kombination synthetischer Netze mit realen Netzdaten ist ebenfalls möglich und ermöglicht die integrierte Betrachtung beider Spannungsebenen auch dort, wo lediglich elektrische Netzdaten für die Mittelspannungsebene vorliegen. Als synthetische Modellnetze werden stets solche Datensätze bezeichnet, die wie reale Netzdaten für Lastflussrechnungen genutzt werden können, aber künstlich generiert werden, um beispielsweise Spannungsebenen

übergreifende Steuerungsstrategien zu entwickeln.

Synthese von Niederspannungsnetzen

Bei der Integration neuer Technologien in Verteilungsnetze ist eine Bewertung der zu erwartenden Betriebszustände mittels Anschlussleistungen und Gleichzeitigkeitsfaktoren nicht zielführend. Bundesweite Aussagen hinsichtlich zukünftig zu erwartender durchschnittlicher und maximaler Belastungen von Transformatoren und Kabeln sowie der Spannungsverläufe entlang der Leitungen erfordern auf Grund der zunehmenden Komplexität und der Vielzahl möglicher Betriebszustände hingegen Lastflussrechnungen. Da die hierzu notwendigen Netzdaten nicht in ausreichender Anzahl vorhanden sind um allgemeingültige Aussagen zu erzielen, wohl aber relevante statistische Kenngrößen in [1], [2] und [3] ermittelt wurden, können synthetische Modellnetze generiert werden.

Die hierfür nötigen und in dem am IFHT entwickelten Verfahren eingesetzten Kenngrößen beinhalten unter anderem die Leitungslänge, Leitungstypen mit entsprechenden Querschnitten, Verzweigung der Lei-

tungen sowie dem Siedlungstypen zugeordnete Transformatorleistungen mit der Anzahl versorgter Haushalte. Darüber hinaus sind die Abstände zwischen den Hausanschlüssen berücksichtigt. Eine Klassifizierung und spätere Verknüpfung mit Mittelspannungsnetzen erfolgt dabei über die Versorgungsaufgabe, welche durch neun verschiedene Siedlungsstrukturtypen charakterisiert wird. Insbesondere die letztgenannten Parameter ermöglichen dabei auch die Ermittlung der je Anschlusspunkt installierbaren dezentralen Erzeugungsanlagen, in dem aus der Gebäudestruktur auf Dachflächen und Wärmebedarfe geschlossen wird. Die Synthese von Modellnetzen aus den Wahrscheinlichkeitsverteilungen dieser Daten bietet gegenüber der Nutzung realer Netzdaten den Vorteil, dass sich beliebig viele Netze erstellen lassen und somit auch extreme Parameterausprägungen Eingang in die Bewertung finden. Eine Bewertung an Hand vergleichbar vieler realer Netze erfordert dagegen einen ungleich höheren Aufwand zur Datenbeschaffung, Konvertierung und Aufbereitung für die Berechnung. Entsprechende Datensätze für Lastflussrechnungen liegen bei Netzbetreibern für die Niederspannungsebene in der Regel nicht vor. Da sich das Verfahren zur Erstellung der Modellnetze streng an statistischen Daten orientiert, ist dies nicht mit einer automatisierten Zielnetzplanung unter Berücksichtigung der Versorgungsaufgabe gleichzusetzen. Dies führt dazu, dass historisch gewachsene Strukturen implizit Berücksichtigung finden und eine Bewertung der Netze nicht unter idealisierten Bedingungen stattfindet. Eine Ermittlung der zu erwartenden technischen Herausforderungen und des notwendigen Netzausbaus ist somit zuverlässig möglich.

Topologische Generierung von synthetischen Mittelspannungsverteilstnetzstrukturen

Mithilfe des entwickelten Verfahrens sind synthetisierte Mittelspannungsnetze generierbar, die aufgrund ihrer allgemeingültigen Aussagekraft - ähnlich zum obigen Verfahren - Schlüsse zur Aufnahmefähigkeit dezentraler Erzeugung zulassen. Auf Basis einer Analyse und Auswertung der typischen elektrischen und topologischen Eigenschaften zur Verfügung stehender realer Mittelspannungsnetze, sind sowohl erste Allgemeinaussagen über die Topologie als auch die im Zusammenhang stehenden elektrischen Eigenschaften getroffen worden. Zu den wesentlichen ausgewerteten Daten gehören unter anderem die Bevölkerungsdichte, Anzahl der Ortsnetzstationen, Ringlänge sowie die Leitungslänge. Um jedoch insbesondere regionspezifische Aussagen der elektrischen sowie topologischen Kenngrößen zu ermöglichen, müssen die historisch gewachsenen und damit sehr heterogenen Netzstrukturen Berücksichtigung finden. Dafür wurde eine Methode entwickelt, mit deren Hilfe anhand einer Punktwolke aus Netzstationen sowie dem zugehörigen Umspannwerk ein realistisches MS-Netz in zwei Schritten nachgebildet werden kann. Die beschriebene Punktwolke resultiert aus öffentlich zugänglichen Daten und beinhaltet die georeferenzierten Standorte von Ortsnetzstationen sowie Umspannwerken. In einem ersten Schritt wird eine Approximation von Gruppierungen der Ortsnetzstationen getroffen, um erste Ring- sowie weitere typische Strukturen der Mittelspannungsebene zusammenfassen zu können. Der statistischen Analyse und den extrahierten, signifikanten elektrischen sowie topologischen Kenngrößen (s.o.) der realen Netzdaten folgend wird mit Hilfe eines Verfahrens zur heuristischen Lösung des Travelling Salesman-Problems eine erste Optimierung

der Verbindungen zwischen Ortnetzstationen und dem Umspannwerk getroffen. Eine beispielhafte Gegenüberstellung eines Originalnetzes (schwarz) zu einem generierten Mittelspannungsnetz (grau) ist in Bild 1 dargestellt.

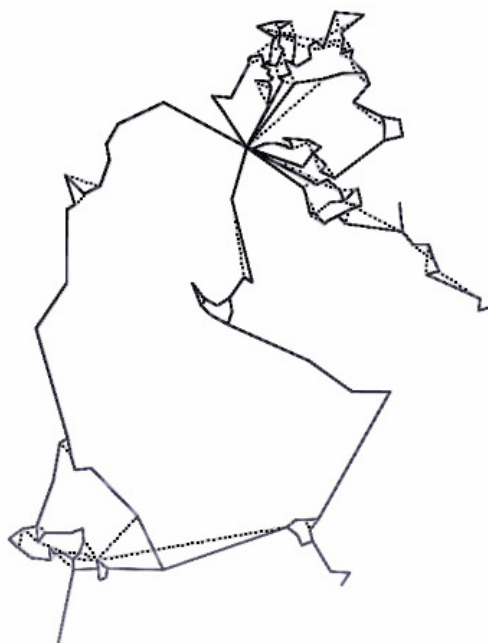


Abb. 1: Vergleich generierte Lösung mit Originalnetz

In einem zweiten Schritt wird dieser heuristische Ansatz unter Einbeziehung aller regionalen Nebenbedingungen (Strassenverlauf, Wälder, Seen, Flüsse sowie Wohn- und Agrarflächen etc.) zu einer (bezogen auf die Leitungsverlegungs- und -materialkosten) minimalen Lösung ausgebaut. Diese kann - je nach Detailgrad der Modellierung - eine erste Annäherung bis exakte Abbildung eines realen bereits bestehenden MS-Netzes liefern und daher als Benchmark für das Verfahren dienen. Hierbei werden die realen Leitungswege unter Einbeziehung einer genauen Modellierung der Randbedingungen (insbesondere aller Straßen, Wälder, Seen, Flüsse sowie Wohn- und Agrarflächen) möglichst exakt nachgebildet.

Mithilfe des zweistufigen Verfahrens lassen sich unter Berücksichtigung lokaler Rah-

menbedingungen reale topologische Verläufe von Mittelspannungsnetzen generieren, die eine Zielnetzplanung als auch Generierung einer Vielzahl von Mittelspannungsnetzen ermöglichen.

Quellen

- [1] Jörg Scheffler, Bestimmung der maximal zulässigen Netzanschlussleistung photovoltaischer Energiewandlungsanlagen in Wohnsiedlungsgebieten Dissertation an der TU Chemnitz, Chemnitz, 2002
- [2] Georg Kerber, Statistische Analyse von NS-Verteilungsnetzen und Modellierung von Referenznetzen http://www.hsa.ei.tum.de/Publikationen/2008/_KerberWitzmann_Energiewirtschaft_3-2008.pdf
Seitenabruf: 15.05.2009
- [3] Georg Kerber, Belastungsfähigkeit von Niederspannungsnetzen bei PV-Einspeisung http://www.energieagentur.nrw.de/files/Belastungsfähigkeit_von_Niederspannungsnetzen.pdf
Seitenabruf: 11.09.2009

Kontakt

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

Philipp Erlinghagen, B. Sc.
Philipp.Erlinghagen@rwth-aachen.de

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

Modell des europäischen Übertragungsnetzes zur Bewertung von Ausbaumaßnahmen

In vielen Ländern unterliegen die Erzeugungsstrukturen elektrischer Energie einer starken Transformation hin zu dezentralen und volatilen Energiewandlungsanlagen. Allein in Deutschland sollen bis zum Jahr 2030 25GW Offshore-Windenergieanlagen gebaut werden. Diese Transformation der Erzeugungsstrukturen und die fortwährende Ausdehnung des grenzüberschreitenden Stromhandels stellen neue Anforderungen an das Übertragungsnetz, die Maßnahmen zur Steigerung der Übertragungskapazitäten unumgänglich machen. Am IFHT werden in diesem Zusammenhang unter anderem Netzausbaumaßnahmen und die dafür erforderlichen Rahmenbedingungen analysiert.

Mit dem Wandel der elektrischen Energieversorgung stehen Übertragungsnetze vor neuen Herausforderungen und Belastungen. Heutige Übertragungsnetze wurden für zentrale und lastnahe Erzeugung erbaut und ausgelegt. In vielen Ländern zeichnet sich jedoch eine Transformation der Erzeugungsstrukturen, besonders hin zu regenerativen Energien, ab, die im Allgemeinen dezentral, volatil und lastfern positioniert sind. Hinzu kommen Einflüsse wie die Ausdehnung des grenzüberschreitenden Stromhandels. Aus diesen Entwicklungen ergeben sich neue Anforderungen für Übertragungsnetze. Netzengpässe werden somit zukünftig wesentliche Barrieren für die weitere Integration elektrischer Energiebereitstellung auf regenerativer Basis darstellen. Insbesondere Deutschland sieht sich mit der hohen Förderung regenerativer Energiequellen mit dieser Netzproblematik konfrontiert.

EU-Netzmodell

Um eine Integration der elektrischen Energie aus regenerativen Quellen in das Übertragungsnetz zu ermöglichen, wird ein Ausbau des Netzes unumgänglich sein. Eine Analyse dieses Ausbaubedarfs erfordert ein exaktes Wissen über den Aufbau des Netzes, Last- und Erzeugungsstrukturen sowie deren Wandel.

Für diese Betrachtungen wurde am IFHT ein Modell des europäischen Übertragungsnetzes entwickelt, das neben dem Netz auch Last und Erzeugung in hoher geografischer Genauigkeit enthält. Das Netzmodell beinhaltet mehrere Tausend Knoten, Leitungen und Transformatoren sowie mehr als 2500 Kraftwerksblöcke (vgl. Abb. 1). Sämtliche Netzknoten und Erzeugungseinheiten sind georeferenziert, sodass die Auswirkungen lokaler Veränderungen der Erzeugung auf das Übertragungsnetz abgebildet werden können. Die Modellierung der Erzeugungsstruktur erfolgt mittels verschiedener Datenbanken, in denen Standortinformationen europaweit hinterlegt sind.

Zur Abbildung zeitlicher Veränderungen der Erzeugungsstrukturen werden verschiedene Szenarien der länderbasierten Entwicklungen der Erzeugungsstrukturen eingebracht. Diese geben für jedes Land und jeden Kraftwerkstyp die Entwicklung der installierten Leistung an. Unter Kenntnis geplanter Kraftwerksneubauprojekte und der Altersstruktur des bestehenden Kraftwerksparks ist es möglich, auch eine räumliche Information über die Entwicklung der Erzeugung zu erhalten. So ist mit gewisser Genauigkeit bekannt, wo neue Kraftwerke mit welchen Eigenschaften entstehen könnten und wo dagegen alte Generatoren abgerüstet werden.

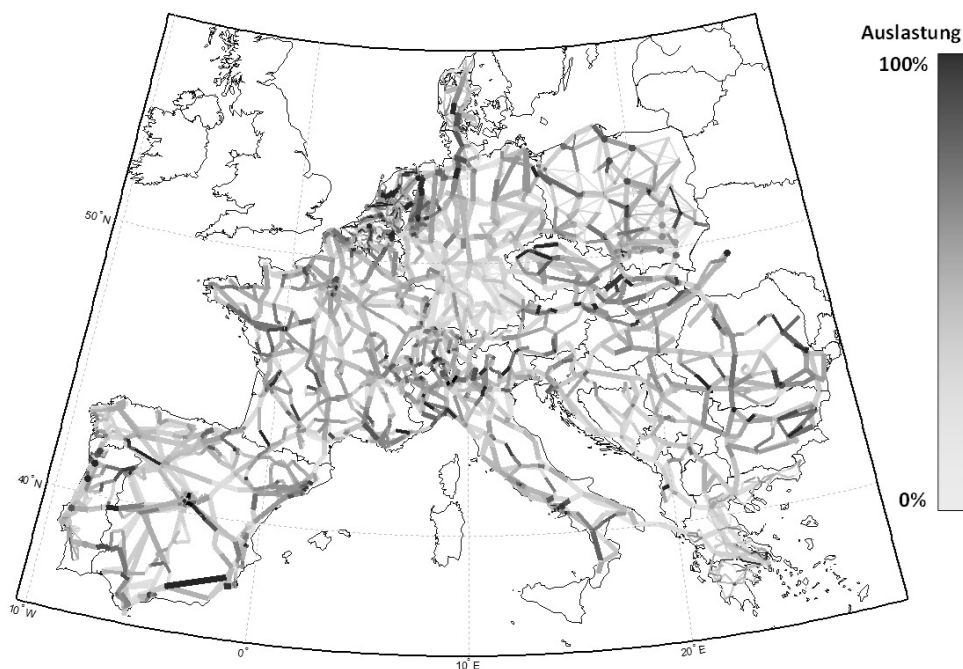


Abb. 1: Teile des Übertragungsnetzmodells, Belastungen nach OPF in Fall Starkwind und Starklast

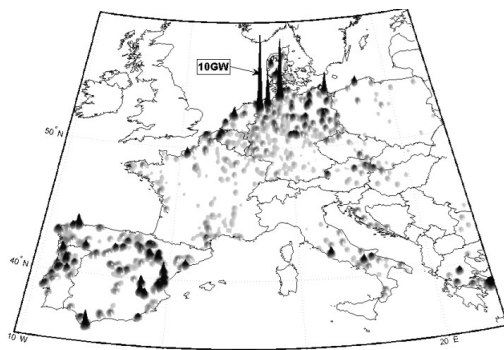


Abb. 2: Installierte WEA-Leistung 2030

Die Elemente der adaptierten Kraftwerksdatenbanken werden dann als Generatoren mit entsprechenden Eigenschaften den Knoten des Netzmodells zugeordnet, was durch die Geoinformation in den Modellen ermöglicht wird.

Die Last sowie die installierte Leistung aus Windkraft- und PV-Anlagen können unter Anwendung verschiedener Verfahren in knotenbasierten Größen aufgelöst werden. Exemplarisch ist in Abb. 2 die prognostizierte installierte Leistung an Windkraftanlagen nach Zuordnung zu den Netzkno-

ten im Jahr 2030 zu sehen. Deutlich treten die Spitzen an der deutschen Nordseeküste hervor, die aus den Offshore-Projekten resultieren. Durch Kombination der Modelle lässt sich ein vereinfachtes Gesamtmodell der europäischen Stromversorgung erstellen. Zur Simulation dieses Gesamtmodells werden verschiedene Methoden herangezogen, unter anderem Lastflussrechnung (Power Flow, PF), Lastflussoptimierung (Optimal Power Flow, OPF) oder sicherheitsbeschränkte Lastflussoptimierung (Security Constrained OPF, SCOPF). Je nach Anwendungsfall lassen sich Zielfunktion und Nebenbedingungen der Formalismen problemspezifisch formulieren, sodass beispielsweise Kosten- oder Emissionsminimalität unter Beachtung von Netzrestriktionen erzielt wird. Trotz der Vielzahl der Parameter und Variablen lässt sich ein vollständiger OPF für einen Zeitpunkt mit inkludierter Betrachtung von Blindleistungen und Netzverlusten (AC-OPF) für das beschriebene Modell in Zeitbereichen durchführen, die einen Einsatz in Szenarioanaly-

sen, Monte-Carlo-Simulationen etc. erlauben.

Zur Abbildung verschiedener Belastungssituationen werden Szenarien definiert, die einerseits unterschiedliche Lastsituationen abbilden. Andererseits werden lokal verschiedene Verfügbarkeiten regenerativer Energiequellen betrachtet, z.B. der manuell definierte Fall eines Starkwindes im Nordseeraum.

Netzausbaumaßnahmen

Anhand der Georeferenz ist es möglich, vorher identifizierte Ausbaumaßnahmen in das Netzmodell mit hoher lokaler Genauigkeit zu integrieren und deren Auswirkungen zu untersuchen. Zur ökonomischen Bewertung werden beispielsweise die Erzeugungskosten betrachtet, die sich im OPF ergeben. Werden etwa durch eine Ausbaumaßnahme wesentliche Netzrestriktionen aufgehoben, lässt sich die Erzeugung entsprechend günstiger betreiben. Zur technischen Betrachtung können potentielle Belastungen von Leitungen im $(n-1)$ -Störfall, also bei Ausfall anderer Betriebsmittel, betrachtet werden, die durch Ausbaumaßnahmen gegebenenfalls reduziert werden. Für eine ökologische Bewertung werden unter anderem die CO_2 -Emissionen der Kraftwerke betrachtet, die sich in einer vom OPF berechneten, kostenoptimalen Erzeugungssituation ergeben. Als Erweiterung finden verschiedene Optimierungsansätze Anwendung, wie z.B. ein vereinfachter Ecological OPF. So ist es möglich, Netzausbauprojekte zu identifizieren, die zwar aus ökonomischer Sicht sinnvoll wären, aus ökologischer jedoch nicht und umgekehrt.

Das Netzmodell und die Methodik zur Bewertung von Ausbaumaßnahmen unterliegen einer stetigen Weiterentwicklung. Für lokal hochdetaillierte Analysen wird das Netzmodell um unterlagerte Netzebenen erweitert. Außerdem wurden die Netzbereiche Skandinavien, Großbritannien und Ir-

land hinzugefügt, sodass beispielsweise die Analyse des von der Europäischen Kommission initiierten „North Sea Grids“ ermöglicht wird, einem Plan zum Bau eines Netzes in der Nordsee, durch das Offshore-Anlagen mit den Anrainerstaaten verbunden werden sollen. Abbildung und Bewertung von Technologien, die für derartige Projekte diskutiert werden, wie hybride Netzstrukturen, FACTS, vermaschte HGÜ-Netze (Hochspannungsgleichstromübertragung), sind Gegenstand aktueller und zukünftiger Arbeiten am IFHT.

Zusammenfassung

Mit den entwickelten Modellen und deren geplanten Erweiterungen werden am IFHT verschiedene Ansätze zur Steigerung der Kapazitäten in Übertragungsnetzen untersucht, mit dem Ziel, die Integration nachhaltiger Energiebereitstellung zu gewährleisten. Als globale und langfristige Maßnahme wird der Netzausbau, vor allem im europäischen Übertragungsnetz, mit den am IFHT entwickelten Modellen detailliert untersucht und bewertet.

Danksagung

Das Netzmodell wurde für das EU-FP7 Projekt IRENE-40 (irene-40.eu) erstellt.

Kontakt

Dipl.-Ing. Hendrik Natemeyer
natemeyer@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94913

Dipl.-Ing. Sebastian Winter
winter@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94914

Dipl.-Ing. Martin Scheufen
scheufen@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94941

Betriebsoptimierung integrierter Versorgungssysteme für Strom und Wärme

Mit Hilfe eines entwickelten Modells zur Analyse von elektrischen Wärmepumpen und dezentral arbeitenden Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung wird ein Verfahren entwickelt, das eine optimale Betriebsführung dieser Anlagen durch Erzeugungs- und Lastmanagement erreichen soll. Dabei wird auch der Einfluss von elektrischen und thermischen Speichern beim Einsatz in Verteilungsnetzen bei unterschiedlichen Zielfunktionen untersucht.

Einleitung

In den kommenden Jahren werden starke Veränderungen der Energieversorgung mit einem wachsenden Anteil regenerativer Energieträger erwartet. Es werden Maßnahmen zum Umgang mit der fluktuierenden Einspeisung benötigt, um weiterhin eine störungsfreie Versorgung mit elektrischer Energie zu gewährleisten. Die Integration von Energiespeichern in die bestehenden Stromnetze kann ein wichtiger Bestandteil sein. Dabei eröffnet der Einsatz von thermischen Speichern die Möglichkeit, die Betriebsführung von Wärmepumpen und Blockheizkraftwerken an die jeweilige Stromnachfrage im Netz anzupassen, ohne die Sicherstellung der Wärmeversorgung zu gefährden.

Modellierung der Anlagen

Die dezentralen Wandlungstechnologien werden überwiegend verbrauchernah an die jeweiligen Verteilungsnetze auf Niederspannungsebene angeschlossen und sind in einem Versorgungsgebiet in der Regel unabhängig voneinander in Betrieb. Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) arbeiten heute dabei meist wärmegeführt, das heißt, dass ihr Betriebszustand von den jeweiligen lokalen Wärmelasten abhängt. Um den Einfluss der dezentralen Energiebereitstellung in bestehenden Verteilungsnetzen zu untersuchen und eine ökologische, ökonomische und technische Analyse nach [1] durchführen zu können, wird in

MATLAB eine Bottom-Up-Modellierung einzelner dezentraler Wandlungstechnologien unter Beachtung ihres stochastischen Betriebsverhaltens vorgenommen. Das Gesamtsystem wird dann aus einer Vielzahl einzelner Anlagen auf Basis derer stochastische Last- bzw. Erzeugungsprofile gebildet. Der Einsatz von thermischen und elektrischen Speichern in intelligenten Verteilungsnetzen wird für verschiedene Betriebsstrategien untersucht. Die betrachteten Technologien für die Wärmeversorgung sind Blockheizkraftwerke und Wärmepumpen, wobei für jede Anlage zusätzlich ein thermischer Speicher eingesetzt wird, um den unerwünschten Taktbetrieb der Anlagen zu vermeiden. Zusätzlich werden auf historischen Wetterzeitreihen beruhende Erzeugungsprofile für Photovoltaik- und Kleinwindkraftanlagen generiert.

Beispielhaft wird die Vorgehensweise für KWK-Anlage beschrieben. Deren Leistung wird im Modell vor dem Hintergrund des Wärmebedarfs des jeweiligen Gebäudes auf einen für bivalenten Betrieb typischen Wert festgelegt. Zusätzlich wird im Modell ein Spitzenlastkessel pro Anlage berücksichtigt, um die notwendige, nicht durch KWK bereitgestellte Wärme für kälteste Tage sicherzustellen. Als Eingangsparameter verwendet das Modell ein Wärmelastprofil in 15-minütiger Auflösung, das sowohl Raumwärme- als auch Warmwasserbedarf berücksichtigt. Gebäudetyp, Baujahr und Sanierungsstand werden dabei entsprechend [2] berücksichtigt. Jede KWK-

Anlage wird zu jedem Zeitintervall des Tages entsprechend des lokalen Wärmebedarfs und des vorhanden thermischen Speichers ein- bzw. ausgeschaltet, so dass sich ein individuelles Erzeugungsprofil für jeden Tag des Jahres ergibt.

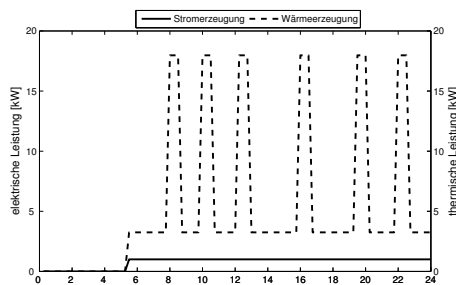


Abb. 1: Beispielfhaftes synthetisiertes Erzeugungsprofil KWK

In Abb. 1 ist beispielhaft ein Erzeugungsprofil für eine KWK-Anlagen eines Einfamilienhauss an einem Wintertag dargestellt. Wichtig ist, dass individuell für jeden Haushalt andere Profile erstellt werden, so dass später die Gesamtheit der Anlagen ein realistisches Bild der Erzeugungssituation darstellt.

Energiespeicher

Obwohl sich grundsätzlich verschiedene Technologien zur Speicherung thermischer Energie eignen, können heute nur sensible Speicher¹ wirtschaftlich betrieben werden. Diese können für Temperaturniveaus der Heizungswärmeversorgung in Form von isolierten Wassertanks realisiert werden. Dabei sorgt die im Vergleich mit anderen Materialien wie Beton oder Sand hohe Wärmekapazität des Wassers von 1,17 Wh/(kg*K) für eine für Wohngebäude hinreichend kompakte Bauweise der Speicher. Latentwärmespeicher und thermische Speicher auf Basis reversibler chemischer Prozesse werden aufgrund der geringen Markverfügbarkeit und hohen Kosten nicht betrachtet, können aber grundsätzlich bei Ver-

wendung einer anderen Kosten- und Verlustleistungsfunktion in das Modell aufgenommen werden. In Bezug auf die Speicherung elektrischer Energie wurde die Untersuchung auf Batteriespeicher beschränkt. Diese gelten aufgrund ihrer flexibel wählbaren Größe und Standortunabhängigkeit als bevorzugte Technologie für den Einsatz in Verteilungsnetzen. Verschiedene Technologien mit unterschiedlichen Investitionskosten, Wirkungsgraden und Standverlusten wurden betrachtet.

Optimierung des Betriebs

Die Betriebszeiten der KWK Anlagen richten sich im wärmegeführten Betrieb allein nach dem thermischen Energiebedarf des zu versorgenden Objektes, die bei der Wärmeerzeugung gleichzeitig produzierte elektrische Energie wird unabhängig von der Stromnachfrage ins Netz eingespeist. Kombiniert mit weiterer lokaler Erzeugung kann die Situation entstehen, dass bestehende Stromüberschüsse weiter verstärkt werden.

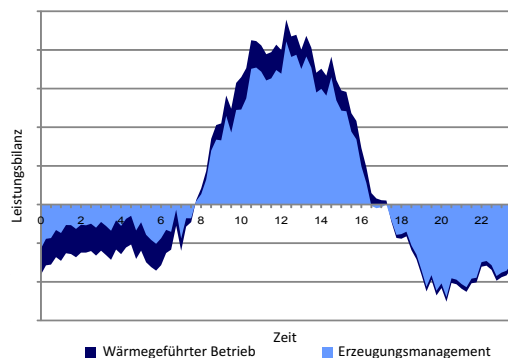


Abb. 2: Betriebsführung von KWK-Anlagen

Durch den Einsatz thermischer Energiespeicher wird der Betrieb der BHKW so beeinflusst, dass die KWK Anlagen stromgeführt betrieben werden, also möglichst in den Zeitpunkten, in denen auch elektrische Leistungsdefizite herrschen. Den Einfluss auf die Leistungsbilanz eines Versorgungsgebietes zeigt Abb. 2. Der thermische Speicher gewährleistet bei dieser Be-

¹Direkte Speicherung fühlbarer Wärme durch Aufheizung des Speichermediums

triebsweise, dass der Bedarf an thermischer Energie zu jeder Zeit gedeckt wird. Neben der Zielgröße Autarkie, bei der eine Versorgung des betrachteten Gebietes möglichst unabhängig vom überlagerten Netz basierend auf dezentraler Energiewandlung angestrebt wird, wurde als weitere Zielgröße eine Harmonisierung der Lastflüsse implementiert, die die maximale Auslastung der Betriebsmittel reduziert und so die Übertragungsverluste verringert. Bei den Zielgrößen gemein ist die Vorgehensweise der Einsatzoptimierung durch Erzeugungsmanagement bei KWK Anlagen bzw. Lastmanagement bei Wärmepumpen.

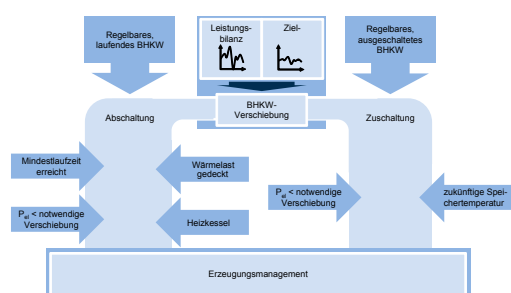


Abb. 3: Erzeugungsmanagement

Im Folgenden wird die Vorgehensweise für KWK Anlagen erläutert. Zunächst wird anhand der Speichertemperatur und einer Reihe technischer Parameter geprüft, ob sich die Anlage in einem Zustand befindet, der einen Eingriff in den aktuellen Betriebszustand erlaubt. In einer Voraussicht über die kommenden 24 Stunden wird bei einer Auflösung von 15 Minuten jeweils der aktuelle Betriebszustand analysiert und gegebenenfalls steuernd eingegriffen. Vereinfacht sind die Restriktionen in Abb. 3 dargestellt.

Exemplarische Ergebnisse

Das entwickelte Modell wurde an einem exemplarischen Versorgungsgebiet mit 102 privaten Haushalten angewendet. Die lokale Stromerzeugung aus KWK (56%), Photovoltaik (36%) und Windenergie (8%) entspricht dabei ungefähr dem jährlichen Energiebedarf der Haushalte von etwa

300 MWh, wobei saisonal Diskrepanzen zwischen Erzeugung und Verbrauch von über 20% auftreten. Für Vergleiche der Investitionskosten wurden Preise und Lebensdauern nach [3] angenommen. Die Untersuchungen zeigen, dass im kombinierten Betrieb von KWK Anlagen und Speichern in einem intelligenten Verteilungsnetz bis zu einem von den Randbedingungen des Versorgungsgebietes abhängigen Punkt thermische Speicher vergleichbare Autarkiegrade erzielen wie elektrische, jedoch zu deutlich niedrigeren Kosten.

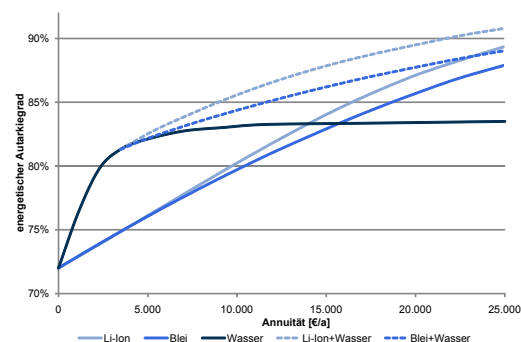


Abb. 4: Energetischer Autarkiegrad

Der Nutzen thermischer Speicher steigt bei geringen zusätzlichen Kosten zunächst deutlich schneller als bei Batteriespeichern, gerät allerdings schnell in einen Bereich der Sättigung. Die Verhältnisse in Abb. 4 sind exemplarisch für das oben beschriebene Versorgungsgebiet, heutigen Batteriepreisen und -lebensdauern. Eine Szenarioanalyse hat gezeigt, dass, unabhängig von der genauen Auslegung der Anlagen, sich prinzipiell immer ein Bereich ergibt, in dem thermische Speicher den elektrischen überlegen sind. Durch den kombinierten Betrieb von elektrischen und thermischen Speichern (gestrichelte Linien) lassen sich die Autarkiegrade bei im Vergleich zum Einsatz von Batterien niedrigeren Kosten weiter steigern. Während die Autarkiemaximierung das Ziel hat, eine ausgeglichene Leistungsbilanz anzustreben, ist der Zielwert bei der Harmonisierung der Lastflüsse variabel. Für das oben beschriebene

ne Versorgungsgebiet wurde viertelstündlich eine 24-stündige Voraussicht auf Einspeisung und Last durchgeführt, aus der die mittlere Leistungsdifferenz berechnet und als Zielgröße festgelegt wurde (Abb. 5).

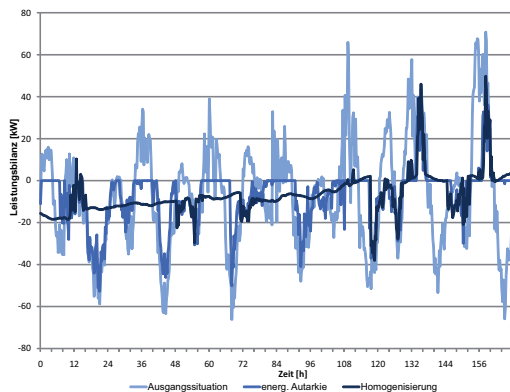


Abb. 5: Leistungsbilanz des Systems einer ausgewählten Woche

Zu erkennen ist die Zeitabhängigkeit der Zielgröße, die von -18 kW über die Woche hinweg leicht ansteigt. Kleine Schwankungen der Leistungsdifferenz können so beinahe vollständig ausgeglichen werden, während große Ungleichgewichte (wie am Ende der betrachteten Woche) genau wie bei autarkie-maximierenden Betriebsstrategien nicht gänzlich kompensiert werden können. Insgesamt zeigt eine Auswertung der Betriebsmittel, dass eine signifikante Reduktion der Auslastung von Leitungen und Ortsnetztransformator möglich ist.

Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellte Modellierung erlaubt es, das Betriebsverhalten von dezentralen Energiewandlungsanlagen in einem ersten Schritt zu simulieren und das Zusammenspiel vieler Anlagen auch im Hinblick ihrer Auswirkungen auf die elektrischen Energieversorgungsnetze zu untersuchen. Anschließend wurde ein Erzeugungs- und Lastmanagement so vorgenommen, dass sich die Leistungsbilanz des Versorgungs-

gebiets möglichst entsprechend einer zu wählenden Zielgröße verhält. Dazu wurde der Einsatz von thermischen und elektrischen Energiespeichern mit einbezogen. Das Modell soll in Zukunft mit einer Auslegungsoptimierung für dezentrale Anlagen verknüpft werden, um so eine optimale Versorgungsstrategie für ganze Bezirke erstellen zu können. Ausgehend von der Möglichkeit, zumindest zeitweise das System autark versorgen zu können, soll die Zielfunktion dahingehend erweitert werden, dass ein Energieaustausch mit dem überlagerten Versorgungsnetz von den externen Großhandelsstrompreisen abhängig gemacht wird.

Quellen

- [1] T. Smolka: *Ökologisch-technische Auswirkungen dezentraler Energieversorgungsszenarien mit Blockheizkraftwerken in elektrischen Verteilungsnetzen*; Disseratition, RWTH Aachen, Aachen 2008
- [2] W. Lutsch et al.: *Perspektiven der Fernwärme und der Kraft-Wärme-Kopplung*; AGFW e.v., Frankfurt 2005
- [3] U. Bünger et al.: *Energiespeicher in Stromversorgungssystemen mit hohem Anteil erneuerbarer Energieträger*; Energietechnische Gesellschaft im VDE (ETG), Frankfurt 2009

Kontakt

Dipl.-Ing. Sepideh Doroudian
Sepideh.Doroudian@rwth-aachen.de

Dipl.-Ing. Stefan Kregel
kregel@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-93034

Agentenbasierte Verkehrsmodelle zur lokalen Emissionsanalyse

Mittels einer agentenbasierten Verkehrsmodellierung und der separaten Betrachtung jedes einzelnen Fahrzeugs, können die Auslastungen von Straßen in einer hohen zeitlichen Auflösung ermittelt werden, sowie die bisher durchgeführten Analysen der zeitlich differenzierten Ladevorgänge um eine räumliche Komponente erweitert werden. Dies ermöglicht es durch die Beobachtung der Bewegungsmuster, eine Abschätzung der lokal generierten Emissionen durchzuführen und räumliche Kopplungen von Ladevorgängen der Fahrzeuge zu untersuchen.

Einleitung

Die erwartete starke Zunahme der Elektromobilität stellt für Netzbetreiber eine neue Herausforderung für den zuverlässigen und sicheren Betrieb der Energieversorgungsnetze dar. Ein integriertes Modell von Elektrizitätsnetzen und Transportsystemen bietet durch die gemeinsame Betrachtung von Energie- und Verkehrsflüssen die Möglichkeit, Auswirkungen einer flächendeckenden Integration von Elektrofahrzeugen auf Versorgungsnetze zu untersuchen. Hierzu werden zunächst synthetische Fahrprofile generiert und später durch reale Fahrdaten ersetzt.

Verkehrsmodell

Eine besondere Bedeutung kommt bei der Verkehrsmodellierung dem Straßennetz und dem Verkehr zu. Mit der genauen Kenntnis des Aufenthaltsortes eines jeden Fahrzeugs sollen Aussagen über die Verfügbarkeit und das Potential der in einer Region vorhandenen Fahrzeuge und deren Speicherkapazität getroffen werden. In einem weitergehenden Schritt wird die Kenntnis über das Fahrverhalten genutzt, um gezielt Ladevorgänge zu steuern. Um Fahrpläne für die Fahrzeuge generieren zu können, sind Informationen darüber notwendig, wo die Fahrzeugnutzer wohnen und wohin sie beruflich fahren (Pendler) bzw. wohin sie privat fahren.

Die verwendeten, frei verfügbaren Geodaten enthalten neben den Straßenzügen ebenfalls Informationen über die Flächennutzung. Diese wurden in weitere Ebenen extrahiert. (Abb. 1) zeigt beispielhaft die Ebenen „Straßennetz“ und „Wohngebiete“.



Abb. 1: Straßennetz und Wohngebiete

Integrierte Modellierung

Durch Zusammenführung der Teilmodelle „Verkehrsnetz“ und „Elektrizitätsnetz“ gelangt man zu einem integrierten Verkehrs- und Energieflussmodell, wie es in (Abb. 2) gezeigt ist. Ein weiterer Bestandteil ist eine zentrale Steuerung, mit der sich die Ladevorgänge der Fahrzeuge beeinflussen und kontrollieren lassen. Diese ist umso effektiver, je mehr Informationen sie von den Fahrzeugen erhält. Den größten Nutzen generieren die Daten über Standzeit und zukünftige Fahrziele der Fahrzeuge. Diese müssen vom Fahrzeugnut-

zer dem Fahrzeug mitgeteilt werden, z.B. durch ein modifiziertes Navigationssystem. So können Ladevorgänge während der Parkphasen bei Bedarf sowohl zeitlich als auch räumlich optimal gesteuert werden.

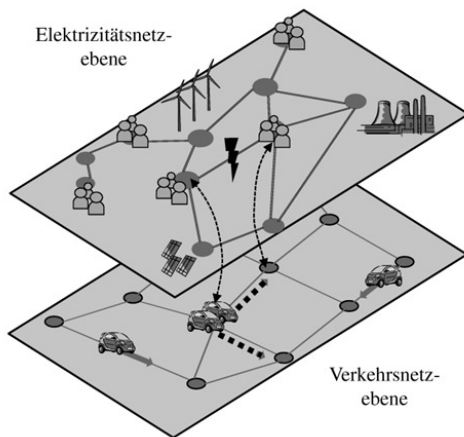


Abb. 2: Integriertes Simulationsmodell

Ergebnisse der integrierten Modellierung

Es wurden die Auswirkungen des ungesteuerten Ladeverhaltens der Fahrzeugpopulation auf das Elektrizitätsnetz untersucht. Hierbei sind drei Szenarien zur Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur, „flächendeckend“, „zu Hause“ oder „zu Hause und am Arbeitsplatz“ betrachtet worden. In (Abb. 3) ist die durch Elektrofahrzeuge verursachte Zunahme der Gesamtlast in einem betrachteten Gebiet dargestellt. Das hier betrachtete, ländlich geprägte Gebiet hat eine Größe von ca. 2000 km² mit ca. 290.000 Einwohnern sowie 150.000 PKW, von denen 30 Prozent elektrisch fahren sollen. Die Spitzenlast beträgt ca. 360MW. Hierbei ist zu beachten, dass bei Betrachtung eines einzelnen Tages nur in 65 Prozent der Fälle Fahrzeuge gefahren werden und im Idealfall der Rest in einem geparkten und mit dem Netz verbundenen Zustand verbleibt.

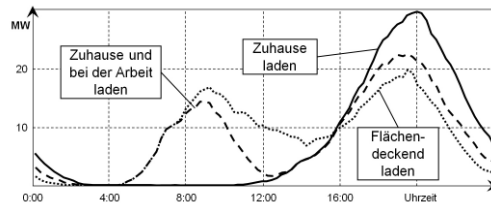


Abb. 3: Lastzunahme durch Elektrofahrzeuge

Ökologische Auswirkungen

In einem weiteren Schritt können die ökologischen Auswirkungen von Elektrofahrzeugen auf ihre Umgebung erfasst und ein Vergleich zu herkömmlichen PKWs gezogen werden. Um einen adäquaten Vergleich zwischen Elektrofahrzeugen und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ziehen zu können, bedarf es zunächst klar abgegrenzter, ökologisch kritischer Bereiche, den sogenannten Wirkungskategorien, in welchen der Vergleich stattfinden soll. Hierfür werden Bereiche herangezogen, in welchen auf den ersten Blick ein Unterschied zwischen den beiden Fahrzeugarten, mit Hinblick auf die ökologischen Auswirkungen, zu vermuten ist. Die Untersuchungen des Feinstaubes zählt dazu, da ein elektrischer Motor beim Fahrvorgang kein Feinstaub ausstößt. Weiter verursacht ein elektrischer Motor keinen Lärm und keine lokalen CO₂ Emissionen. Bei den behandelten Wirkungskategorien handelt es sich folglich um Feinstaub, Lärm und den lokalen CO₂-Ausstoß. Um den Einfluss einer Integration von Elektrofahrzeugen in diesen Bereichen darstellen zu können, wird durch das Modell zu Beginn der momentane Zustand der Belastungssituation in der behandelten Region abgebildet. Darauf aufbauend, wird durch Erhöhung des Anteils an Elektrofahrzeugen der Einfluss dieser dargestellt.

Im Bereich des Feinstaubes spart ein Elektrofahrzeug im Vergleich zu einem herkömmlichen Fahrzeug etwa 70% des Ausstoßes ein. Die verbleibenden 30% wer-

den durch Reifen- und Straßenabrieb emittiert und können durch Elektrofahrzeuge nicht vermieden werden. Mit Hilfe von Angaben über den Ausstoß pro PKW lassen sich Aussagen über die Feinstaubbelastung der Straßen in g/km treffen. Eine Umrechnungsmethode wurde mit Hilfe realer Messdaten aufgestellt. Die sich dadurch ergebende Größe dient als Erwartungswert für statistische Auswertungen für die Wahrscheinlichkeit der Grenzwertverletzung. Als Ergebnis der Simulation im Bereich des Feinstaubes lässt sich festhalten, dass geringe Durchdringungsraten, welche in naher Zukunft realistisch sind, nur einen geringen Effekt auf den Feinstaub im Jahresmittel hätten. So würde ein Anteil von 10% Elektrofahrzeugen zu einer Senkung der Feinstaubbelastung um 1,7% in einer stark belasteten Straße führen. Diese Abnahme der Belastung würde jedoch einen erheblichen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit der Grenzwertverletzung haben. Bei 10% Elektrofahrzeugen würde diese in einer stark befahrenen Straße von über 60% auf unter 40% fallen, wie in (Abb. 4) zu sehen ist. Eine merkliche Verbesserung der Lebensqualität ist jedoch erst mittelfristig bei einem Anteil von über 30% Elektrofahrzeugen realistisch.



Abb. 4: Feinstaubkonzentration bei verschiedenen Szenarien und Wahrscheinlichkeit der Grenzwertverletzung

Die Berechnung des CO₂-Ausstoßes erfolgt nach gleicher Vorgehensweise. Es werden Daten über den CO₂-Ausstoß der auf den Straßen fahrenden PKWs herangezogen, um die Belastung zu berechnen. Grundlage hierfür ist der Lärmmittlungspegel L_{DEN}. Die Berechnung der einzelnen Größen ist abhängig von der maßgeblichen Verkehrsstärke und dem durchschnittlichen LKW-Anteil einer Straße. Im Bereich der lokalen CO₂-Emissionen ist mit einer erheblichen Entlastung durch Elektrofahrzeuge zu rechnen. Der Straßenverkehrslärm geht durch eine Integration von Elektrofahrzeugen vor allem in Wohngebieten, stark zurück. Bei einem Anteil von 10% Elektrofahrzeugen geht die Belastung in Straßen mit einem Tempolimit von 30 km/h um 6% zurück und bei einer Geschwindigkeitsbegrenzung von 50 km/h lediglich um 2%. Insgesamt führt eine starke Integration von Elektrofahrzeugen vor allem in den Innenstädten zu einer Entlastung in Bezug auf die betrachteten Wirkungskategorien. Bei niedrigen Durchdringungsraten ist der Effekt allerdings gering. Elektrische Mobilität wird darum erst mittelfristig die Lebensqualität steigern.

Kontakt

Dipl.-Ing. Thomas Helmschrott
helmschrott@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-97340

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

Synthetische Generierung von Netztopologien unter Nutzung öffentlich zugänglicher Daten

Die zuverlässige Abschätzung von Betriebsmittel-Mengengerüsten in elektrischen Übertragungsnetzen weltweit ist aufgrund lückenhafter und uneinheitlicher öffentlicher Datenlage eine Herausforderung. Die Ergebnisse einer solchen Abschätzung, insbesondere kostenintensiver Betriebsmittel wie Leistungstransformatoren, sind Bestandteil der Entscheidungsfindung unternehmerischen Handelns im Energiesektor. Das hier vorgestellte Verfahren der synthetischen Netzgenerierung ist in der Lage, auf Basis öffentlich zugänglicher Informationen sowie technischer, wirtschaftlicher und geographischer Randbedingungen, ein die Versorgungsaufgabe erfüllendes Netz für ein Land auf der "grünen Wiese" zu ermitteln. Das resultierende synthetische Netz ermöglicht die Approximation der Mengengerüste von kostenintensiven Betriebsmitteln im tatsächlichen elektrischen Übertragungsnetz eines Landes.

Einleitung

Für die Ermittlung der Anzahl installierten Betriebsmittel in elektrischen Übertragungsnetzen einzelner Länder oder Regionen existiert keine weltweite Datenbasis. In europäischen Ländern sind teilweise Daten zur Anzahl und kumulierten Kapazität von Leistungstransformatorenanzahlen sowie Trassenlängen verfügbar. Diese unterliegen jedoch einer uneinheitlichen und teils unvollständigen Erhebung. Die zuverlässige Kenntnis der aktuellen Betriebsmittel-Mengengerüste ist wichtige Grundlage für wirtschaftliche und strategische Entscheidungen wie Netzankäufe, Infrastruktur-Investitionen, Erschließung neuer Märkte für Produkte und Dienstleistungen sowie die Einschätzung der eigenen Marktposition. Für die synthetische Netzgenerierung werden die historischen Entwicklungen als nicht rekonstruierbar angesehen. Relevant sind somit geographische Randbedingungen und die räumliche Verteilung von Lasten und Erzeugung. Ausgehend von aktuellen Eingangsdaten wird auf der "grünen Wiese" ein minimales Referenznetz entwickelt, das die Versorgungsaufgabe des Übertragungsnetzes erfüllen kann. Voraus-

setzung für die Anwendbarkeit ist eine zentralisierte Erzeugungsstruktur durch Großkraftwerke in den zu untersuchenden Ländern. Ergebnis des Verfahrens sind die Netzstruktur und die Mengengerüste der kostenintensiven Betriebsmittel eines synthetischen Netzes.

Analyse verfügbarer Eingangsdaten

Als Eingangsdaten des Verfahrens werden Daten verwendet, welche entweder über bestimmte Areale kumuliert vorliegen sowie solche mit Georeferenzierung. Kumulierte Größen werden weltweit landesscharf erhoben. Die Auswahl der Größen, die Kriterien zur Erhebung und die räumliche Auflösung differieren dabei jedoch stark zwischen den erhebenden Stellen. Die Sammlung und Vereinheitlichung von Daten zu Betriebsmittel-Mengengerüsten aus einzelnen, verstreuten Quellen erweist sich für eine weltweite Datenbasis als nicht praktikabel. Beispiele für weltweit verfügbare und annähernd einheitlich erhobene kumulierten Daten mit Einfluss auf die Mengengerüste sind:

- Installierte Kraftwerksleistung

- Jährlich erzeugte, importierte und exportierte elektrische Energie
- Jährlicher Energieverbrauch und Verluste
- Gesamtbevölkerung
- Elektrifizierungsgrad

Georeferenzierte Daten ordnen geographischen Punkten oder Flächen Eigenschaften zu. Eigenschaften von Flächen liegen dann in Form von Rasterdaten vor. Georeferenzierte geographische Informationen, wie die Diskriminierung zwischen Land- und Wasserflächen, Höhenprofile etc., stehen für alle Länder weltweit zur Verfügung. Georeferenzierte Daten zur elektrischen Lastverteilung sind für die Mehrzahl der Länder nicht verfügbar und müssen somit aus anderen Größen abgeleitet werden, die als Basis zu deren Abschätzung dienen. Z.B.

- Bevölkerungsdichte
- Flächennutzung
- Elektrische Nachtbeleuchtung
- Elektrifizierungsgrad

Georeferenzierte Daten zu Erzeugungsstandorten sind ebenfalls weltweit verfügbar oder können durch eine erprobte systematische Vorgehensweise mit kalkulierbarem Aufwand gewonnen werden. Der initiale Grad der Erfassung der zentralen Erzeugung gemessen an den kumulierten Größen liegt i.d.R. über 70%.

Die weitere, kombinierte Verarbeitung dieser verschiedenen Eingangsdatentypen wird im nächsten Abschnitt aufgezeigt.

Verfahrensübersicht und Ergebnisse einer Beispielanwendung

Das Verfahren der synthetischen Netzgenerierung nutzt die vorgestellten verfügbaren Eingangsdaten, um ein technisch zulässiges, versorgungszuverlässiges und wirtschaftliches elektrisches Übertragungsnetz

zu erzeugen. Das Verfahren folgt dabei den in Abb. 1 dargestellten Schritten.

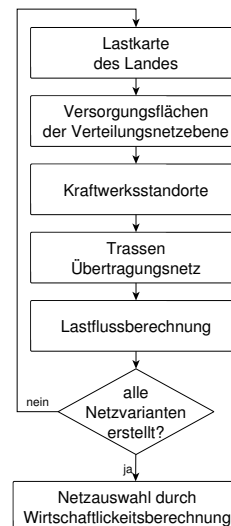


Abb. 1: Flussdiagramm des Verfahrens

Zur Ermittlung der Lastkarte wird eine Korrelation der Verteilung von elektrischer Last und der Bevölkerung auf der Landesfläche angenommen. Grundlage dieser Annahme ist die sich wechselseitig bedingende Lage von Schwerpunkten der Bevölkerung und der Wirtschaftssektoren. In Abb. 2 wird die ermittelte Lastkarte für die Niederlande gezeigt, die eine sehr gute Übereinstimmung mit veröffentlichten Lastkarten des Niederländischen Übertragungsnetzbetreibers aufweist. Der Algorithmus zur Generierung der Versorgungsflächen der Verteilungsnetzebene (inkl. Hochspannungsebene) nutzt die ermittelte Lastkarte. Jede dieser Versorgungsflächen schließt als Black Box ohne detailliertere Strukturabbildung die Last eines errechneten geographischen Abschnittes der Landesfläche bis zu einem bestimmten Grenzwert ein und erhält mit einer Schaltanlage einen zentralen Abspannpunkt zwischen Übertragungs- und Verteilungsnetzebene.

Alle Abspannpunkte bilden zusammen mit den Erzeugungsstandorten die Knoten, die durch das Übertragungsnetz verbunden werden müssen.

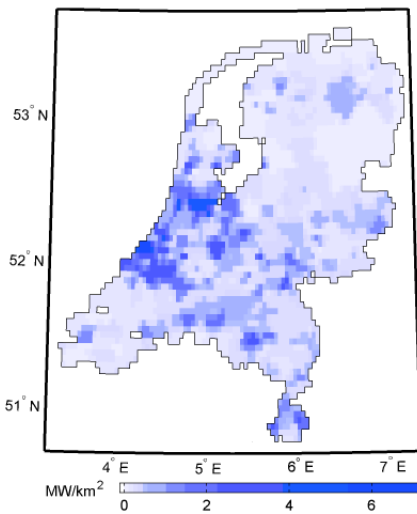


Abb. 2: Ermittelte Lastverteilung

Sowohl die Leistungsdimensionierung der Transformatoren an den Abspannpunkten, als auch die Auslegung der Stromkreise des Übertragungsnetzes werden unter Gesichtspunkten der Versorgungssicherheit vorgenommen. Eine Überlastung im Höchstlastfall sowie beim Ausfall eines Betriebsmittels oder eines Stromkreises wird durch entsprechende Auslegung und Redundanzen vermieden.

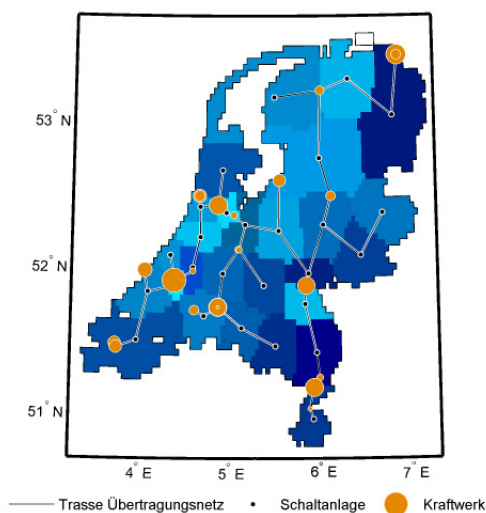


Abb. 3: Synthetisch generiertes Netz mit Versorgungsflächen inkl. Abspannpunkten und Kraftwerken

Aus allen zulässigen generierten Netzvarianten wird durch den Vergleich der Wirtschaftlichkeit ein optimales synthetisches Netz als Ergebnis des Verfahrens identifiziert. Die Wirtschaftlichkeitsberechnung berücksichtigt jährliche Zahlungsreihen aus den Betriebskosten und den annuitätischen Investitionskosten der Betriebsmittel. Abb. 3 zeigt ein solches synthetisches Netz für die Niederlande.

Diskussion und Ausblick

Das gezeigte Verfahren ermittelt am Beispiel der Niederlande einen Wert für die Stromkreislängen von ca. 90% und für die Transformatoranzahl von ca. 92% des realen Wertes. Dabei bleiben länderübergreifende Kuppelleitungen und verschiedene Höchstspannungsebenen derzeit noch unberücksichtigt.

Im Gegensatz zu rein statistischen Verfahren ist die synthetische Netzgenerierung in der Lage, sowohl die geographischen Gegebenheiten eines Landes, als auch strukturelle Informationen wie z.B. die Verteilung der Bevölkerung zu berücksichtigen. Das generierte elektrische Netz basiert zudem auf technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, um eine bestmögliche Abbildung der Realität gewährleisten zu können. Aufgrund des Ansatzes der wirtschaftlichen Optimierung eines elektrischen Netzes bei Planung auf der "grünen" Wiese, zeigt die synthetische Netzgenerierung zusätzlich Potential zur Generierung von optimalen Referenz- oder Zielnetzen für die aktuelle Versorgungsaufgabe.

Kontakt

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

Dipl.-Ing. Tilman Wippenbeck
wippenbeck@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-90015

Fehlfunktionen bestehender Schutzsysteme in Verteilungsnetzen durch dezentrale Einspeiser

Hohe Durchdringungsraten mit dezentralen Erzeugern und Speichern gefährden ggf. in Zukunft die Funktionalität und Selektivität der Schutzsysteme in elektrischen Verteilungsnetzen. Die Bandbreite der relevanten Faktoren erschwert aktuell sowohl eine effiziente Einschätzung der Gefährdungslage als auch eine objektive Entscheidung zu notwendigen Maßnahmen. Dieser Artikel gibt eine Übersicht über die vielfältigen Faktoren, zeigt beispielhaft Netzschutzgefährdungen auf und präzisiert die zu beantwortenden Fragestellung.

Schutz in heutigen Verteilungsnetzen

Der Selektivschutz in Verteilungsnetzen der öffentlichen Versorgung erfolgt im Wesentlichen durch richtungsunempfindliche Überstromzeitschutzeinrichtungen. Beispiele solcher Schutzeinrichtungen sind:

- Sicherungen (NH+HH)
- Leitungsschutzschalter
- Selektive Hauptschalter (SH)
- Überstromschutzrelais + Leistungsschalter

Die Auslegung dieser Schutzeinrichtungen beruht auf der Annahme eines einheitlichen Leistungsflusses im Normal- und Fehlerzustand zur Netzperipherie, deren Stromstärke signifikant differiert. In Abwesenheit von dezentralen Erzeugern und Speichern stellen die genannten Schutzeinrichtungen in robuster, wirtschaftlicher und langjährig erprobter Weise den geschützten Netzbetrieb sicher.

Szenarien der Verteilnetzentwicklung

Die zunehmende Integration dezentraler Erzeuger (z.B. Photovoltaik, Blockheizkraftwerke, kleine Windenergieanlagen und Laufwasserkraftwerke) und zukünftig auch rückspeisefähiger Speicher (z.B. Elektrofahrzeuge und Brennstoffzellen) - im folgenden dezentrale Einspeiser - führt mit

wachsender Durchdringung zur fortwährenden oder zeitweisen Verletzung dieser Annahme.

Neben dem grundsätzlichen Wandel der Annahmen zum Stromfluss in den Verteilungsnetzen als momentanes Schutzkriterium werden in der Fachwelt Szenarien zum notwendigen Wandel der Netze selbst aufgespannt und propagiert. Hierzu zählt der Übergang der Betriebsweise zu geschlossenen Ringen oder vermaschten Netzen, z.B. um eine Verbesserung der Spannungshaltung und Minimierung von Netzrückwirkungen zu ermöglichen.

Eine Erhöhung der Anzahl beeinflussbarer Elemente sowie Sensoren wird als notwendig erachtet. Beeinflussbar sein sollen Trennstellen, Lasten und Einspeiser. Hierzu ist ein weitreichender Einsatz von Automatisierungs- und Kommunikationstechnik notwendig. Als Chance zur Erweiterung der bestehenden Sensorik wird unter anderem der Einsatz von Smart-Metern wahrgenommen.

Insgesamt soll durch die Summe dieser Maßnahmen zur aktiven Steuerung des Netzbetriebes eine optimale Ausnutzung der gegebenen Strukturen gewährleistet und Energieeffizienz umgesetzt werden. Zur Gewährleistung einer hohen Versorgungszuverlässigkeit wird für die zukünftige Betriebsweise auch eine zeitweilige Inselnetzbildung autarker Netzbereiche vorgeschla-

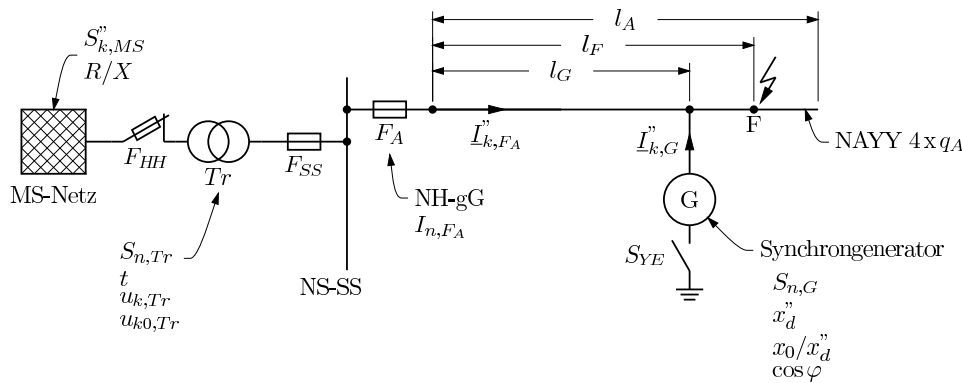


Abb. 1: Blinding des Abgangsschutzes F_A . Relevante Modellparameter nach DIN VDE 0102.

gen, um eine Versorgungsunterbrechung beim Schwarzfall des überlagerten Netzes zu vermeiden.

Der in diesen Szenarien aufgespannte Wandel bedingt hohe Investitionen durch die Verteilungsnetzbetreiber, um die notwendige Infrastruktur zur Umsetzung dieser Ansätze bereitzustellen. Die hohe Stromkreislänge und Komponentenzahl lassen einen bedarfsgetriebenen, allmählichen Wandel vermuten. Dadurch werden über einen langen Zeitraum passive und aktive Verteilungsnetze koexistieren.

Szenarien des Einspeiserverhaltens

Neben dem Wandel der Struktur der Verteilungsnetze wird auch ein Wandel der Anforderungen an die Einspeiser selbst erwartet.

Einspeiser mit Anschluss an ein Niederspannungsnetz sollen nach heutigen Anforderungen eine möglichst rasche Netztrennung im Falle eines Netzfehlzustandes oder einer ungewollten Inselnetzbildung vollziehen. Durch diese Passivierung sollen unter anderem die bei der Auslegung der Schutzsysteme gültigen Rahmenbedingungen wiederhergestellt und deren ordnungsgemäße Funktion sichergestellt werden.

Bereits heute wird aber von Mittelspannungseinspeisern die Möglichkeit zur Erbringung von System- und Netzdienstleistungen gefordert. Mit der flächendecken-

den Integration von dezentralen Erzeugern und Speichern (Elektromobilität) deutet sich auch für die Niederspannungsebene zukünftig ein Bedarf hierfür an. Die Passivierung als Maßnahme scheidet in diesem Falle zum Erhalt der Schutzfunktionalität aus. Im Rahmen von Netzen mit lokal hohen Anteilen dezentraler Einspeiser sind zudem s.g. Microgrid-Strukturen denkbar - also Teilnetze mit unterdimensionierten Netzanbindungen. Hier ist eine Aufrechterhaltung der Versorgung durch das Netz allein evtl. nicht mehr möglich, so dass eine Trennung aller dezentralen Einheiten keine Option darstellt.

Solange die beschriebene Infrastruktur zur Steuerung und Regelung der Netze nicht flächendeckend zur Verfügung steht, muss von einem zunächst ungesteuerten Verhalten der angeschlossenen Einspeiser ausgegangen werden.

Gefährdung des Schutzes

Für den Fall ungesteuerter Einspeiser wird von Beeinträchtigungen der ordnungsgemäßen Funktionalität der bestehenden Schutzeinrichtungen in den Verteilungsnetzen ausgegangen. Ein Beispiel hierfür ist die unzulässige zeitliche Verzögerung einer Auslösung unter hohem Lebensdauerverbrauch oder Zerstörung von Komponenten und ggf. unter Gefährdung des Perso-

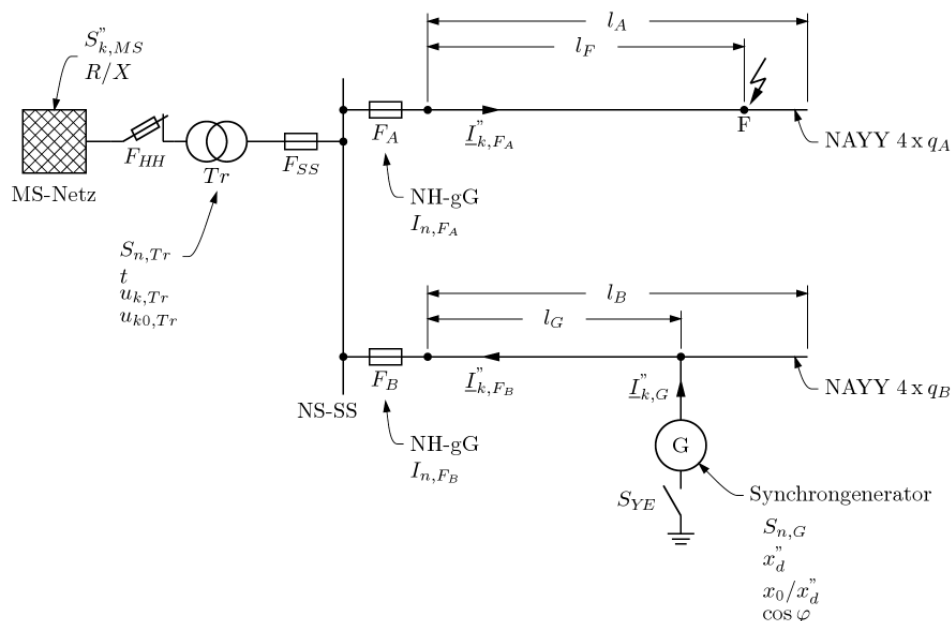


Abb. 2: Sympathetic Tripping des Abgangsschutzes F_B bei einem Fehler in Strang A. Relevante Parameter bei Modellierung nach DIN VDE 0102.

nenschutzes. Den als Blinding bekannten Effekt zeigt Abb. 1.

Ein anderes Beispiel ist die unselektive, mitgehende Auslösung von gesunden Netzbereichen im Fehlerfall in Abb. 2. Unter bestimmten Randbedingungen kann es zur Auslösung des Abgangsschutzes B vor dem eigentlich zuständigen Abgangsschutz A kommen.

Auch weitere Beispiele führen gleichermaßen zu vermeidbaren Kosten und Versorgungsunterbrechungen. Entscheidende Folge der Integration dezentraler Einspeiser ist, dass die Netzbereiche des Verteilungsnetzes ihre bisherige Unabhängigkeit bei der schutztechnischen Betrachtung und Absicherung verlieren. Es wird nun eine Betrachtung des Gesamtnetzes mit allen seinen Komponenten gleichzeitig notwendig.

Auch im Fall eines kontrollierten Netzbetriebes muss der Schutz gewährleistet werden, auch dann, wenn Leittechnik oder Kommunikationstechnik versagen. Zudem existieren neuartige Systemzustände, bei denen Annahmen der bisherigen Netz-

schutzauslegung grundlegend verletzt sind. Diese können durch das bestehende Schutzsystem nicht beobachtbar sein, wodurch es zu einem Versagen des Netzschutzes kommt. Ein Beispiel hierfür sind innere Überlastsituationen als Netzanomalie, die bestehende Schutzeinrichtungen nicht auslösen.

Resultierende Fragestellungen

Grundsätzliches Problem ist der Umstand, dass die Grenzen der ordnungsgemäßen Funktionalität der bestehenden Netzschutzsysteme nicht hinreichend quantitativ bekannt sind. Einzelfalluntersuchungen wie sie von Schutzabteilungen und in der Forschung durchgeführt werden, ermöglichen es für spezifische Netzverhältnisse notwendige und angemessene Handlungsmaßnahmen abzuleiten. Die Erkenntnisse mit geringem Aufwand auf die breite Palette und hohe Anzahl diversitärer heutiger und zukünftiger Verteilungsnetze zu übertragen erscheint jedoch nicht möglich.

Die genannten Einzelfalluntersuchungen können nicht gänzlich durch eine zukünftige Kenntnis der Funktionsgrenzen der Schutzsysteme substituiert werden. Ihre Kenntnis und die Entwicklung von Methoden zu ihrer Bestimmung ist aber Voraussetzung um eine Reihe von Fragen in der Fläche effizient beantworten zu können:

- In welchen Netzen besteht ein Bedarf zur Anpassung des Schutzsystems?
- Ist es möglich Regeln abzuleiten, welche mit geringem Aufwand eine vorläufige Bedarfseinschätzung ohne Einzelfallrechnung ermöglichen?
- Wie hoch ist der akute Anpassungsbedarf?
- Werden die Funktionsgrenzen des Netzschutzes erreicht, ohne dass vorher anderweitige Grenzen erreicht werden (Spannungshaltung, Stromtragfähigkeit)?
- Durch welche Maßnahmen kann die Funktionstüchtigkeit der bestehenden Schutzeinrichtungen erhalten werden?

- Welche Anforderungen müssen neu entwickelte Schutzsysteme erfüllen?
- Welcher Lösungsansatz ist technisch-wirtschaftlich optimal?

Die noch ausstehende Ermittlung der Grenzen der ordnungsgemäßen Funktionalität des bestehenden Netzschutzes begründet sich in der neuartigen Komplexität der schutztechnischen Betrachtung.

Derzeit wird ein Projekt zur Beantwortung der obigen Fragen am Institut für Hochspannungstechnik in Kooperation mit Industriepartnern entwickelt. Hierin wird eine simulatorische Analyse erfolgen. Die hierzu erforderliche Modellbildung sowie die Ergebnisse werden im Prüf- und Qualifizierungszentrum des IFHT an realen Netztopologien validiert.

Kontakt

Dipl.-Ing. Tilman Wippenbeck
wippenbeck@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-90015

Life Management von Transformatoren basierend auf Online-Monitoring-Daten

Das Life Management strebt an, den Betrieb von Assets bis nahe an das Ende seiner Lebensdauer zu ermöglichen. Dieser Artikel fokussiert auf die Vorhersage der Restlebensdauer eines Transformators abhängig von der Alterung der Feststoffisolation bei unterschiedlichen Einsatzszenarien. Zusätzlich wird ein Alterungsmodell erweitert, indem weitere wesentliche Alterungsursachen und die Korrelation von Betrieb und Alterung untersucht werden. Neue Ansätze für die Prognose der Restlebensdauer werden entwickelt, indem Zeitreihen-Daten aus einem Online-Monitoring-System analysiert werden.

Einleitung

Der Zustand der Feststoffisolation ist irreversibel. Daher ist die Lebensdauer eines Transformators i.A. durch die Lebensdauer seiner Feststoffisolation beechränkt. Ein bekanntes Kriterium dafür ist der Polymerisationsgrad. Dieses Untersuchung dieses Parameters verlangt aber das komplette Ausschalten des Transformators damit eine Papierprobe für diesen Test genommen werden kann und somit wird die Durchführung einer kontinuierlichen Zustandsbewertung unmöglich. Daher ist es nötig eine Methode zur Altersbestimmung zu entwickeln, bei der die Altersursachen bezüglich des Betriebs berücksichtigt werden. Eine Übersicht zu dieser Forschungsarbeit zeigt Abb.1.

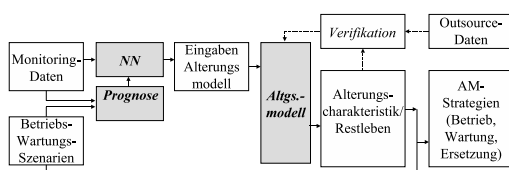


Abb. 1: Übersicht dieser Forschungsarbeit

Die aus dieser Methode erhaltenen Informationen zu den Altersmerkmalen vereinfachen das Treffen von Entscheidungen bezüglich der optimalen Maßnahmen, die an bestimmten Zeitpunkten an den Transformatoren zu ergreifen sind. Diese Maßnahmen sind beispielsweise eine Überlastbegrenzung, eine Kontrolle der Küh-

lungseinheiten, die Durchführung eines Öltrocknenprozesses oder die Planung der Re-Platzierung oder Ersetzung von veralteten Betriebsmitteln.

Alterungsmodell mittels Fuzzylogik

Die Feststoffisolation besteht im Wesentlichen aus Zellulose. Mit der Zeit verfällt dieser Stoff aus drei Hauptgründen: Hitze, Feuchtigkeit und Sauerstoff. Zwecks einer Vereinfachung und Verbesserung der Verifikation des Alterungsmodells unter Verwendung von effektiven Daten aus einer umfangreichen Transformatoranzahl wird das Modell zunächst mit Hilfe von Fuzzylogik (FL) entwickelt. Dieses Modell basiert auf den Ergebnissen von [1].

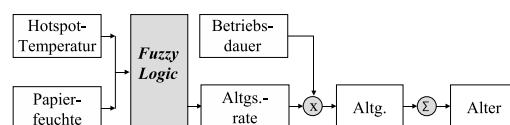


Abb. 2: Altersbestimmung mittels FL

Weiterhin sind die entsprechende Eingaben der Hotspot-Temperatur (HST) und der Papierfeuchte (WIP) erforderlich. Sauerstoff wird an dieser Stelle nicht berücksichtigt, da das Sauerstoff-Niveau i.A. vom Öl-Präservierungssystem vernachlässigbar klein gehalten wird [2]. Die Altersrate ist das Ergebnis des Fuzzy-Modells. Eine Übersicht des entwickelten Modells wird in Abb.2 veranschaulicht. Aufgrund sei-

ner Genauigkeit und Effizienz wird hier das Sugeno-Modell 0-ten Grades verwendet.

Betriebseinfluß auf die Alterung

Die Öltemperatur (TOT) ist für die Berechnung der HST erforderlich. Der Einsatz von Neuronalen Netze (NN) ist in diesem Fall das Mittel der Wahl zur Bestimmung der TOT. Für die Entwicklung, das Training und das Testen der Netze werden Zeitreihen-Daten aus historischen Datenbanken eines Monitoring-Systems von einem Transformator mit einer 5-jährigen Betriebszeit benutzt. Die wichtigsten Merkmale dieses Trafos sind 350 MVA, 400 kV und ein OFAF-Kühlungssystem. Die Modellierung des neuronalen Netzes basiert auf einer Feed-Forward-Architektur mit einer Zwischenschicht. Als Trainingsmethode wurde der Levenberg-Marquardt-Algorithmus gewählt. Der Zwischenschicht wurde die Sigmoid-Funktion als Aktivierungsfunktion zugeordnet. Die Ausgabeschicht ist mit einer linearen Funktion versehen. In dieser Arbeit wurden 3 Typen von NN verwendet, ein statisches NN (SNN), ein NN mit Zeitverarbeitung (TPNN) und ein rekursives NN (RNN) [3]. Diese sind in Fig.3 dargestellt.

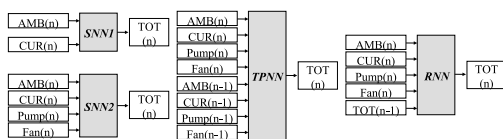


Abb. 3: Entwickelte neuronale Netze

Die gemessene TOT wird im Fall RNN1 zu Testzwecken benutzt, die synthetische TOT im Fall RNN2. Der mittlere absolute Fehler (MAE) zwischen gemessenen und berechneten TOT-Daten definiert die Abbruchbedingung und ist der Hauptfaktor zur Bewertung der Modell-Performance. In einigen Fällen ist der maximale absolute Fehler (MaxAE) besonders hoch. Die Leistung der entwickelten und von herkömmlichen Berechnungsmethoden wird in Tab. veran-

schaulicht. Die Testdaten data1 beziehen sich auf Daten, die über 150 Tage erfasst wurden. Data2 wurde über 3 Jahre gemessen.

Method.	MAE(°C)			Max AE(°C)	
	Train-daten	Test-daten1	Test-daten2	90% Test-daten2	95% Test-daten2
SNN1	3.22	3.80	3.47	7.78	10.32
SNN2	2.58	3.14	3.12	5.73	7.16
TPNN	2.51	3.24	2.94	5.73	7.02
RNN1	0.17	0.22	0.34	0.82	1.28
RNN2	0.17	3.20	5.87	16.43	25.95

Die erhaltenen Ergebnisse aus beiden SNN-Modellen zusammen mit der gemessenen TOT werden in Abb.4 gezeigt. Unter Berücksichtigung des Zustands der Kühlungssysteme, wie bei SNN2, sind die Ergebnisse der berechneten Daten näher an den gemessenen Daten. Insbesondere ist diese Verbesserung bei Zeitintervallen mit hohen Schwankungen vom Strom oder der Umgebungstemperatur bemerkbar.

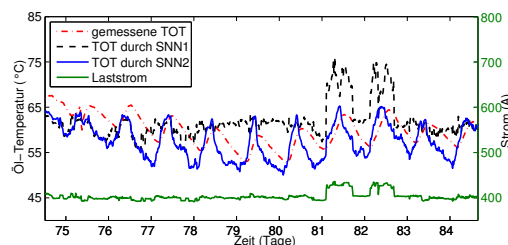


Abb. 4: Gemessene und von SNN1 und SNN2 berechneten TOT-Daten

Da die Eingabedaten in diesem Fall den gemessenen Daten entsprechen, liefern SNN2 und TPNN ähnliche Performance. Der Einfluß der Testdaten auf die Performance kann praktisch vernachlässigt werden, daher können diese Methoden für Langzeitprognosen verwendet werden.

Prognose von Alterungsmerkmalen

Die Prognose von Alterungsmerkmalen kann, aufgrund von Abhängigkeiten mit mehreren Faktoren, nicht aus der Extrapolation von existierenden Daten bestimmt werden. Die Profile von relevanten Alterungs-

faktoren werden mittels Mustererkennung abgeleitet und für Prognosezwecke benutzt. Statistische und Clustering-Funktionen werden für die Bestimmung von täglichen und jährlichen Mustern der Umgebungstemperatur und des Laststroms aus den Zeitreihendaten verwendet. Beide Muster werden durch Modulation überlagert und angewendet.

Implementierung und Ergebnisse

Die entwickelten Alterungsmodelle werden mit Daten der Beispieltransformatoren beaufschlagt, die mindestens fünf Jahre lang in Betrieb waren. Das Alterungsverhalten wird anhand von 3 Betriebsszenarien prognostiziert,

- Szenario 1: Werte von Umgebungstemperatur, Laststrom und Wassergehalt in Öl werden jährlich konstant gehalten
- Szenario 2: die Last wächst jährlich um 3%
- Szenario 2: der Laststrom wird auf 50% des Nennstroms begrenzt.

Die simulierte Alterungseigenschaften werden in Abb.5 dargestellt.

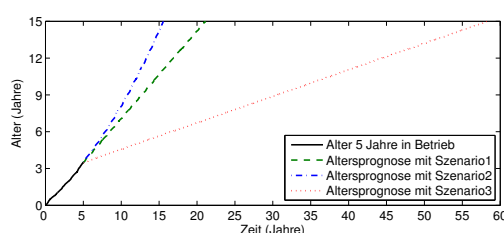


Abb. 5: Prognose von Alterungseigenschaften

Abhängig von einer nominalen Lebenszeit von 15 Jahren und von der Prognose vom Szenario 1 liegt die Restlebensdauer von diesem Trafo bei ca. 16 Jahren. Unter Betrachtung des Lastwachstums wird die Restlebensdauer geringer, während eine Begrenzung der Last eine Erhöhung der Lebensdauer verursacht.

Fazit

Es wurden Alterungsmodelle nach den Ergebnissen aus [1] entwickelt. Die Alterungsrate für jedes Zeitintervall kann bezüglich HST und WIP abgeleitet werden. Ein Fuzzylogik-Ansatz wurde entwickelt, um eine Verifikation und Anpassung der Modell durch numerische Methoden mit den realen Daten zu vereinfachen. Neuronale Netze wurden für die Bestimmung der Öltemperatur entworfen. Die Alterungseigenschaften von Transformatoren können mit den hier entwickelten neuen Methoden ermittelt werden. Weiterhin ist es möglich die Restlebensdauer mittels unterschiedlicher Betriebsszenarien abzuschätzen. Diese Informationen ist sehr hilfreich für die Unterstützung von Netzbetreibern, Wartungspersonal und Netzplanern hinsichtlich wichtiger Entscheidung in Bezug auf die Instandhaltung und den Ersatz von Betriebsmitteln.

Literatur

- [1] A. M. Emsley and G. C. Stevens, *Review of chemical indicators of degradation of cellulosic electrical paper insulation in oil-filled transformers*, IEEE Proceedings Science, Measurement and Technology, 1994.
- [2] IEEE guide for loading mineral-oil-immersed transformers. IEEE Std. C57-91-1995.
- [3] Q. He, J. Si and D. J. Tylavsky, *Prediction of top-oil temperature for transformers using neural networks*, IEEE Transactions on Power Delivery, 2000.

Kontakt

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

Herausforderungen im operativen Asset Management durch die Anreizregulierung

Die finanziellen Mittel, die einem Netzbetreiber zur Verfügung stehen, werden durch die Effizienzvorgaben der seit dem 01.01.2009 rechtskräftigen Anreizregulierung reduziert. Gleichzeitig nimmt der Anteil der Betriebsmittel mit erhöhtem Alter aufgrund des Netzausbaus in den 60er und 70er Jahren zu und macht verstärkt Ersatzinvestitionen notwendig, wodurch der Kostendruck weiter erhöht wird. Um diesen Kostendruck abzuschwächen, können abhängig von der gewählten Instandhaltungsstrategie kurzfristig operative Kosten eingespart werden. Die Kapitalkosten hingegen lassen sich nur langfristig anpassen, sodass die Kostenentwicklung durch die gewählte Instandhaltung eines Netzbetreibers von grundlegender Bedeutung für die Entwicklung einer optimalen Asset Management Strategie ist. In diesem Artikel werden Verfahren zur Optimierung der Instandhaltung und zur Bestimmung des Einflusses dieser Maßnahmen auf die Erlösbergrenzenentwicklung vorgestellt.

Einleitung

Zur Senkung der Betriebskosten, ergibt sich gerade im Bereich der Instandhaltung ein erhebliches Optimierungspotenzial. Ca. 1-1,5 Prozent des Wiederbeschaffungswertes des Netzes wird jährlich in die Instandhaltung investiert [1]. Die Einsparung von Kosten im Bereich des operativen Asset Managements geht häufig mit einer verminderten Zuverlässigkeit der Betriebsmittel einher. Zur Erhaltung einer hohen Netzqualität muss daher der Einfluss der Instandhaltung auf die Häufigkeit der Störungen in der Asset Strategie beachtet werden. In der Anreizregulierung findet die Zuverlässigkeit für die Mittel- und Niederspannungsnetze über das Qualitätselement (Q-Element) Berücksichtigung, wodurch eine zusätzliche Verknüpfung der Instandhaltung mit der Erlösbergrenze besteht. Für den Netzbetreiber bedeutet dies, dass durch Veränderung der Instandhaltungsstrategie die Grenze der erlaubten Erlöse und damit die Gewinnmarge durch die entstehenden Kosten und die resultierende Qualität beeinflusst werden kann. Analysen zur Darstellung und Erklärung der Zusammenhänge zwischen geänderter Instandhaltungsstrategie und den dadurch eingesparten Kosten

werden aktuell am Institut für Hochspannungstechnik (IFHT) durchgeführt. Es werden u.a. Variationen der Instandhaltungszyklen der -strategie und Ansätze zur inhaltlichen Anpassung von Maßnahmen betrachtet. Der Einfluss der Anreizregulierung, z.B. durch die Einteilung der Gesamtkosten in unterschiedliche Kostenanteile und das ab 2012 geplante Q-Element, finden dabei ebenso Berücksichtigung. Letzteres gewinnt durch die dynamisch ansteigenden, zum Teil widersprüchlichen Forderungen von Kunden und Regulierung nach nachhaltig hoher Versorgungsqualität bei geringen Kosten an Relevanz. Da Online-Monitoring Systeme zur Zustandserfassung bei vielen Betriebsmitteln nicht wirtschaftlich realisierbar sind, wird aktuell jedoch häufig auf zeitorientierte Instandhaltung zurückgegriffen. Diese bisherigen, nach festen Zeitintervallen durchgeführten Instandhaltungsmaßnahmen, stellen nicht die effizienteste Variante dar, da die mit ihnen einhergehende Ungewissheit über den aktuellen Zustand des Betriebsmittels zu unnötigen oder zu verspäteten Maßnahmen führen kann. Es wird daher ein Verfahren zur Zustandssprognose entwickelt, welches den Übergang zur zustandsorientierten Instandhaltung ermöglichen soll. Die Kostenanteile

und die daraus resultierende Erlösbergrenze als auch das Q-Element werden zusätzlich exemplarisch berücksichtigt. Aufgrund der zu erwartenden Relevanz wird die Kostenrechnung am Beispiel eines Verteilnetzes vorgestellt.

Zustandserfassung und -prognose

Der Begriff Zustand ist wie folgt definiert: *Zustand ist das Maß der Fähigkeit jedes Betriebsmittels die Funktion oder die Funktionen, für die es geschaffen ist, störungsfrei auszuführen.*

Dabei lässt sich der Zustand durch den Grad der Beeinflussung des schadensfreien Einsatzes des untersuchten Betriebsmittels definieren, welcher mit Hilfe eines Bewertungsmodells quantifiziert werden soll. Ausgangspunkt für die Strukturierung des Bewertungsmodells ist die Vorstellung jedes Betriebsmittels über seine nach der Cigré definierten Funktionen beschrieben werden kann, welche für den in dieser Arbeit beispielhaft betrachteten Leistungsschalter

- das Öffnen und Schließen auf Befehl
- das Abschalten von Strömen
- die verlustfreie Übertragung
- das Aufrechterhalten des Isolationszustands und
- die Schutzfunktionen

umfassen [2]. Als Zustandsmaß gilt somit eine Erfassung und Beurteilung (Gewichtung) aller für diese Funktionen relevanten Parameter eines Betriebsmittels. Diese Erfassung kann mittels Online-Monitoring-Systemen geschehen, welche in Deutschland bereits häufig bei kostenintensiven Assets wie Leistungstransformatoren eingesetzt werden. Um jedoch auch Betriebsmittel wie Leistungs-, Trennschalter oder Wandler mit in die neue zustandsorientierte

Instandhaltungsstrategie einbinden zu können, ist ein Verfahren erforderlich, welches auf Grundlage bereits verfügbarer Daten arbeitet. Ausgangspunkt hierzu sind im betrachteten Fall die Informationen aus Instandhaltungsmaßnahmen. Mit Kenntnis der Entwicklung von den bei Instandhaltungsmaßnahmen detektierten Schäden (Auftrittshäufigkeiten) ist eine Prognose der funktionsrelevanten Parameter möglich. Das Vorgehen zur Zustandsprognose ist im folgenden Schaubild vereinfacht dargestellt.

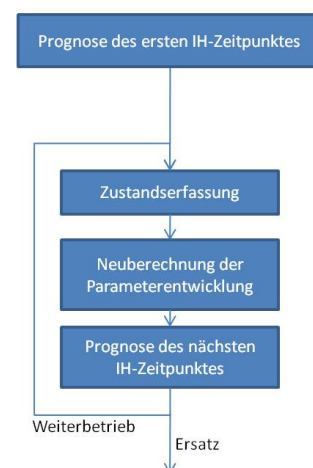


Abb. 1: Verfahren zur Datenbasierten Zustandsprognose

Ausgehend von zurückliegender Betriebserfahrung und dem Schadensverhalten bekannter Komponenten wird der erste Instandhaltungszeitpunkt festgelegt. Bei dieser ersten Maßnahme werden alle relevanten Parameter überprüft und der Zustand (vor der Maßnahme) wird erfasst. Mit den Ergebnissen der Parameterüberprüfung bei der ersten Instandhaltungsmaßnahme wird die Parameterentwicklung an die realen Messwerte angepasst und mit diesen Erkenntnissen wird der folgende Instandhaltungszeitpunkt festgelegt. Dies geschieht rekursiv, solange der Betriebsmittelzustand keinen Ersatz bedingt. Mit dieser Methode wird aktuell für ca. 74 Prozent der betrachteten Betriebsmittel eine ausreichend

genaue Prognose erreicht. Eine Weiterentwicklung des gesamten Verfahrens ist am IFHT in Bearbeitung.

Einfluss der Instandhaltung auf die Erlösobergrenze

Zur Beurteilung, ob eine Instandhaltungsstrategie nicht nur ressourcenoptimal, sondern auch im Sinne der Anreizregulierung ein gewinnbringendes Verfahren darstellt und zur Beurteilung der Frage nach Ersatz oder Weiterbetrieb, ist der Zusammenhang von Instandhaltung und Erlösobergrenze ermittelt worden. Um auch das Q-Element hinsichtlich seines Einflusses einbeziehen zu können, wurden diese Untersuchungen anhand eines repräsentativen Mittelspannungsnetzes durchgeführt. Zur Simulation des Einflusses der Instandhaltung auf das Ausfallverhalten von Betriebsmitteln ist vorerst der in Abb. 2 dargestellte Zusammenhang aus Betriebsdauer und Ausfallrate angenommen.

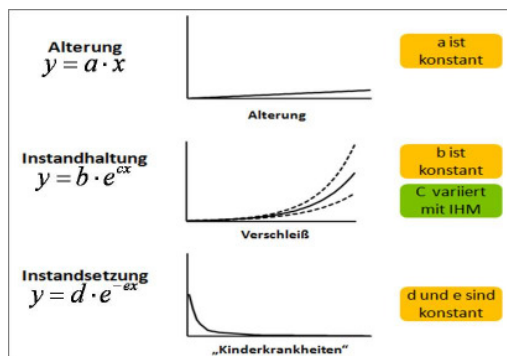


Abb. 2: Ausfallfunktionen von Betriebsmitteln

Auf Grundlage der Daten aus einer Untersuchung der Forschungsgemeinschaft für elektrische Anlagen und Stromwirtschaft [3] wurde eine Modellierung der Ausfallraten durch Regressionsrechnung unter Einbezug der in Abb. 2 dargestellten Modellfunktionen vorgenommen. Unter der Annahme, dass nur die verschleißbedingten Ausfälle durch die Instandhaltung beeinflusst werden, ergibt sich nur für diese exponentielle Funktion eine Abhängigkeit des

Exponenten c von der Instandhaltung. Die Anpassung dieses Parameters an die jeweilige Instandhaltung wurde durch Untersuchung verschiedener Netzbetreiber, deren Betriebsmittelausfällen und Instandhaltungsstrategien vorgenommen. Die betrachteten Betriebsmittel finden sich in Abb. 3. Der Detailgrad der Basisdaten erforderte das Zusammenfassen einiger Assets zu Baugruppen.

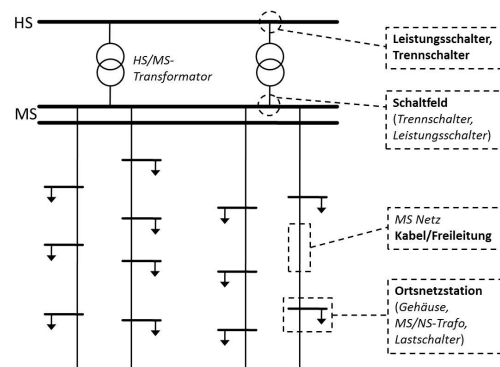


Abb. 3: Betrachtete Komponenten in der Asset Simulation [3]

Als Ergebnis einer Zuverlässigkeitsermittlung lässt sich die Änderung der Versorgungsunterbrechungen ausgehend von einem Basisszenario und somit das Q-Element, unter seiner aktuell angedachten Ausprägung ohne Totband, bestimmen. Bepreist wurde es mit 18 ct. pro min Nichtverfügbarkeit pro Kunde und Jahr, wie es auch durch die Bundesnetzagentur vorgesehen ist. Das Basisszenario in Bezug auf die Instandhaltung besteht nach Auswertung der Informationen verschiedener Netzbetreiber und anschließender Mittelung aus 10 Jahren Wartungsintervall und 2 Jahren Inspektionsintervall sowie einem durchschnittlichen Ersatzalter der betrachteten Komponenten von 40 Jahren. Im Rahmen einer kompletten Asset Simulation für einen städtischen Verteilnetzbetreiber konnte anschließend der Gewinn als Differenz von Erlösobergrenze und Kosten bestimmt werden. Das Ergebnis bei verschiedenen Instandhaltungs- und Investitionsszenarien zeigt Abb. 4.

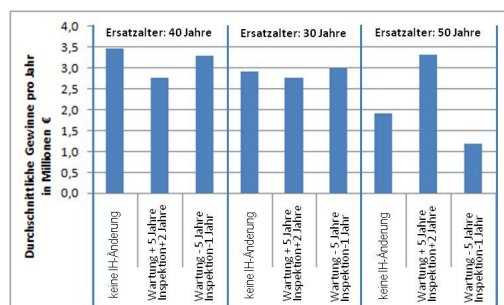


Abb. 4: Ergebnis der Asset Simulation für einen beispielhaften Verteilnetzbetreiber

Es gibt drei mögliche Szenarien, welche einen annähernd gleichen Gewinn aufweisen. Das Ist-Szenario, ein Szenario mit mehr Instandhaltung und ein Szenario mit erhöhtem Ersatzalter und erhöhten Instandhaltungsintervallen. Letzteres wird sich jedoch aufgrund vermehrter Betriebsmittelausfälle negativ auf das Image des Netzbetreibers auswirken, was hier nicht quantifiziert wurde. Als ineffizient ist nach dieser Berechnung das Szenario mit erhöhtem Ersatzalter aber vermehrter Instandhaltung anzusehen.

Zusammenfassung

Netzbetreiber sehen sich aktuell großen Aufgaben gegenüber, die nur durch komplexe Verfahren in ihrer Gänze abbildbar sind. Die Anreizregulierung ist hier als ein maßgeblicher Faktor zu nennen. Die im Artikel vorgestellte, simplifizierte Asset Simulation kann dazu beitragen, Einschätzungen zur Entwicklung des Unternehmensgewinns zu erhalten. Die vorgestellten Ergebnisse unter Berücksichtigung des Q-Elementes verdeutlichen, dass weder die kosten- noch die qualitätsoptimierende Strategie zum maximalen Gewinn führt, da im Mittel die Beibehaltung des aktu-

ellen Qualitätsniveaus vorgesehen ist, was die Wirksamkeit des Q-Elementes bestätigt. Als kostenoptimal und somit im Sinn der Anreizregulierung als effizient gilt allgemein eine zustandsorientierte Instandhaltungsstrategie. Hierzu wurde ein neues datenbasiertes Verfahren vorgestellt, welches unter den gegebenen Bedingungen den Zustand von ca. 75 Prozent der betrachteten Leistungsschalter in adäquatem Maß über einen Zeitraum von 8 Jahren prognostizieren kann. Die Asset Simulation wie auch die Zustandsprognose sind weiterhin Gegenstand der Forschung am IFHT.

Quellen

- [1] J. Wilckens, *Den Herausforderungen der Anreizregulierung mit Lean Methoden begegnen*, proLean Consulting AG, Online-Artikel für den „Bundesverband Deutscher Unternehmensberater BDU e.V.“, 2010.
- [2] CIGRE WG C1.1, *Asset management of transmission systems and associated CIGRE activities*, 2006.
- [3] U. Zickler, A. Schnettler, *Betriebsmittelstatistiken für das Asset-Management: Möglichkeiten und Nutzen*, FGH-Fachtagung „Asset-Management in Verteilungsnetzen; Methoden, Daten, Praxiserfahrungen“, Heidelberg 2006.

Kontakt

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

Verbessertes Druckberechnungsverfahren für den Störlichtbogenfall

Störlichtbögen in elektrischen Anlagen stellen zwar äußerst seltene Fehlerfälle dar, dennoch können sie z. B. durch die Gefährdung des Bedienpersonals, den Ausstoß heißer Gase und den resultierenden Druckanstieg in der Anlage bzw. im Anlagengebäude, gravierende Folgen haben. Daher müssen diese Auswirkungen bereits im Rahmen der Anlagen- und Gebäudedimensionierung berücksichtigt werden, um z. B. durch konstruktive Maßnahmen die Druckbelastungen auf zulässige Werte begrenzen zu können. Zu diesem Zweck werden Berechnungsverfahren verwendet, die eine Bestimmung des zu erwartenden Druckanstiegs im Fehlerfall erlauben. Mit dem hier vorgestellten Referenzverfahren, einer Weiterentwicklung des bereits bewährten PRESSURE-Programms, steht ein Verfahren zur Verfügung, das eine schnelle und zuverlässige Berechnung unter Berücksichtigung von Energieabsorbern, Gasgemischen sowie einer beliebigen Anzahl von Volumina bzw. Räumen erlaubt.

Einleitung

Im Fall eines Störlichtbogens in einer Mittelspannungs-Schaltanlage wird eine elektrische Leistung von bis zu mehreren zehn MW umgesetzt, die zu einem Temperaturanstieg im Isoliergas und damit zu einem Druckanstieg im fehlerbehafteten Schottraum führt. Um ein Bersten des Schottraums zu verhindern, muss eine Druckentlastung, z. B. durch Entlastungsöffnungen in andere Anlagenteile bzw. den Betriebsraum, in dem die Schaltanlage aufgestellt ist, erfolgen. Die mit dem ausströmenden Gas transportierte Energie führt wiederum zu einem Druckanstieg in diesen Räumen, deren mechanische Festigkeit gegen Überdruck z. B. bei Ziegelwänden bereits bei 10 mbar überschritten sein kann. Daher muss bei der Druckberechnung im Störlichtbogenfall insbesondere der Druckverlauf in den angeschlossenen Räumen betrachtet werden [1].

Grundlagen des Druckberechnungsverfahrens

Für die Druckberechnung steht bisher das Verfahren *PRESSURE* zur Verfügung, das auf der Lösung der fluid-

dynamischen Gleichungen und des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik beruht [2]. Der prinzipielle Ablauf dieses Verfahrens ist in Abb. 1 dargestellt.

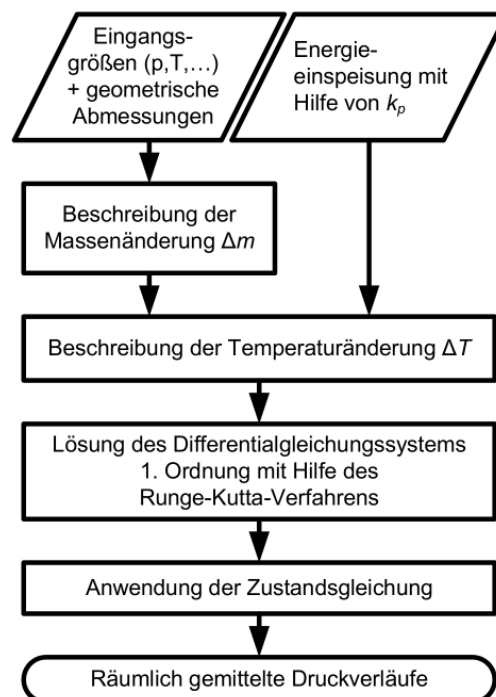


Abb. 1: Ablaufdiagramm des *PRESSURE*-Verfahrens

Der Druckanstieg Δp im fehlerbehafteten Schottraum V_{LB} während des Berechnungszeitschritts Δt hängt neben der ein-

gespeisten elektrischen Leistung P_{LB} und dem thermischen Transferkoeffizienten k_p insbesondere von den Gasdaten in Form des Adiabatenkoeffizienten κ ab:

$$\Delta p = \frac{(\kappa - 1) \cdot k_p \cdot P_{LB} \cdot \Delta t}{V_{LB}}.$$

Dieser Druckanstieg hat einen Masseaustausch Δm in Form einer Gasströmung in die angeschlossenen Volumina zur Folge, wobei dieser über die innere Energie des Gases mit einem Energietransport ΔW verbunden ist. Daraus resultiert wiederum ein Anstieg der Temperatur ΔT und des Drucks Δp in diesen Räumen. Die Masseänderung Δm in einem Zeitschritt Δt durch eine Öffnung (Querschnittsfläche A , Ausflussziffer α) ist abhängig von der Dichte ρ und der Strömungsgeschwindigkeit v des ausströmenden Gases:

$$\Delta m = \alpha \cdot A \cdot \rho \cdot v \cdot \Delta t.$$

Gemeinsam mit der Bestimmungsgleichung für den Temperaturanstieg ergibt sich daraus ein Differentialgleichungssystem, das für alle Volumina iterativ mit Hilfe des Runge-Kutta-Verfahrens gelöst wird, wodurch schließlich die räumlich-gemittelten Druckverläufe in der gesamten Anlage bestimmt werden.

Die Güte der Druckberechnung hängt dabei von der Genauigkeit der Eingangsdaten ab. Zum einen muss die Lichtbogenspannung U_{LB} zur Bestimmung der Lichtbogenleistung P_{LB} bekannt sein und zum anderen muss die zeitliche Veränderung des k_p -Faktors in Abhängigkeit der Gasdichte berücksichtigt werden. Darüber hinaus sind für eine korrekte Berechnung des Drucks exakte Gasdaten unerlässlich [3]. Beispielsweise führen bereits geringe Abweichungen beim Wert des Adiabatenkoeffizienten κ , der für SF_6 nur geringfügig größer als eins ist, zu erheblichen Fehlern in der Berechnung des Druckanstiegs.

Funktionalität des Referenzverfahrens

Das *PRESSURE*-Programm, das auf dem sog. Standardverfahren beruht [2], ist am IFHT im Rahmen des AiF-Vorhabens *Reduzierung der Druckbeanspruchung elektrischer Anlagen im Störlichtbogenfall* durch die Integration zusätzlicher Funktionalitäten weiterentwickelt worden. Das resultierende Verfahren stellt einen erheblichen Fortschritt gegenüber bisher bekannten Verfahren dar.

Während das bisherige Programm nur die Berechnung für Standardanwendungen mit drei Räumen und jeweils einer Öffnung ermöglicht, besteht beim Referenzverfahren keine Beschränkung hinsichtlich der Anzahl der Volumina bzw. der Öffnungen oder deren Anordnung. Auf diese Weise wird die Druckberechnung auch für komplexe Anlagen, z. B. mit mehreren Öffnungen, durch die gleichzeitig eine Entlastung erfolgt, unterstützt.

Eine wichtige Weiterentwicklung bildet die Integration von Energieabsorbern, die in Druckentlastungsöffnungen und -kanälen eingesetzt werden, um den Energieinhalt der ausströmenden Gasmasse zu reduzieren. Mit Hilfe eines physikalischen Modells werden im Referenzverfahren sowohl die Energieabsorption als auch der Strömungswiderstand nachgebildet [4].

Des Weiteren liefert das weiterentwickelte Verfahren die Möglichkeit, eine Druckberechnung nicht nur für luftisolierte, sondern auch für SF_6 -isolierte Schaltanlagen durchzuführen. Dabei wird auch die Vermischung des ausströmenden Isoliergases mit der Umgebungsluft in den Entlastungsräumen und die sich dadurch ergebende Veränderung der Gaseigenschaften berücksichtigt. Die Eingangsdaten basieren auf Realgasdaten, die in Form von Tabellen vorliegen und aus denen mittels Spline-Interpolation die benötigten Werte für die physikalischen Gaseigenschaften ermittelt werden. Auf diese Weise wird eine hohe

Genauigkeit erreicht, die die Zuverlässigkeit der gesamten Druckberechnung signifikant steigert [4].

Die Bedienung des Programms erfolgt über eine grafische Benutzeroberfläche, wobei durch die Realisierung in der Programmiersprache JAVA® eine plattformunabhängige Implementierung erreicht wird. Die Eingangsdaten für die Lichtbogenspannung und den k_p -Faktor basieren auf einer breiten Datenbasis, die verlässliche Werte beinhaltet. Die eingespeiste elektrische Leistung des Lichtbogens P_{LB} kann mit Hilfe eines integrierten Moduls berechnet werden und steht für die anschließende Druckberechnung direkt zur Verfügung.

Weiterhin wird der Variabilitätsgrad hinsichtlich der möglichen Anordnungen dadurch erhöht, dass bei der Berechnung unter anderem die Ansprechdrücke von Berstscheiben oder Druckentlastungskappen zwischen einzelnen Schotträumen mitberücksichtigt werden. Somit lassen sich mit Hilfe dieses Verfahrens nahezu alle in der Realität üblichen Konfigurationen für Mittelspannungs-Schaltanlagen berechnen. Eine Beschränkung auf einzelne Anlagenhersteller, spezielle Aufstellungen oder Anlagentypen besteht nicht.

Mit der Ausgabe weiterer physikalischen Größen wie z. B. der Temperatur oder der Dichte erlaubt das Referenzverfahren eine unmittelbare Überprüfung der berechneten Druckverläufe auf Plausibilität. Im Gegensatz zu ortsauflösenden Berechnungsverfahren, bei denen die Simulation eine Rechenzeit von mehreren Stunden benötigt, liegen die Berechnungsergebnisse bei dem hier vorgestellten Verfahren in kürzester Zeit vor.

Zusammenfassung

Mit dem Referenzverfahren steht jetzt ein Druckberechnungsprogramm zur Ver-

fügung, das sich durch ein Minimum an einschränkenden Voraussetzungen, eine hohe Vielseitigkeit und die Verwendung von Realgasdaten auszeichnet. Das Verfahren ermöglicht eine zuverlässige Druckberechnung für eine Vielzahl von Anwendungsfällen, auch in SF₆-isolierten Schaltanlagen. Es eignet sich, um andere, räumlich mitelnde Berechnungsverfahren zu evaluieren.

Quellen

- [1] Schumacher M.: *Untersuchungen zur Modellierung der Druckbelastung von Schaltanlagegebäuden durch Störlichtbögen*, Dissertation, RWTH Aachen, 1994
- [2] Friberg, G.: *Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Druckbelastung in elektrischen Anlagen im Störlichtbogenfall*, Dissertation, RWTH Aachen, 1998
- [3] Anantavanich, K., Pietsch G., Eichhoff, D.: *Importance of SF₆-air gas data for pressure calculation due to fault arcs in electrical installations*, XVIII International Conference on Gas Discharges and their Applications, Greifswald, 2010
- [4] Anantavanich, K.: *Calculation of Pressure Rise in Electrical Installations due to Internal Arcs Considering SF₆-Air Mixtures and Arc Energy Absorbers*, Dissertation, RWTH Aachen, 2010

Kontakt

Dipl.-Ing. Daniel Eichhoff
eichhoff@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-97348

Berechnung des Druckanstieges in elektrischen Anlagen im Störlichtbogenfall unter Berücksichtigung von SF₆-Luft-Gemischen und Lichtbogenenergieabsorbern

Dissertation: M.Sc. Kittipong Anantavanich
Tag der mündlichen Prüfung: 05. März 2010

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

Zur Bestimmung des Druckanstiegs in Anlagen und Anlagengebäuden im Störlichtbogenfall existieren heutzutage bereits eine Reihe von zuverlässigen Druckberechnungsverfahren. Allerdings ist bislang noch keines bekannt, mit dem SF₆-Luft-Mischungen, wie sie im Störlichtbogenfall insbesondere in SF₆-isolierten Mittelspannungs-Schaltanlagen auftreten, berücksichtigt werden können. - Ähnliches gilt für Lichtbogenenergieabsorber, die in jüngster Zeit vermehrt eingesetzt werden, deren bisherige Modellierung und Einbindung in Druckberechnungsverfahren jedoch verbesserungsbedürftig ist. In der vorliegenden Arbeit werden diese Nachteile beseitigt, in dem SF₆-Luft-Mischungen sowie die Wirkung von Lichtbogenenergieabsorbern in Druckberechnungsverfahren implementiert und validiert werden.

62

Einleitung

Störlichtbögen in elektrischen Anlagen verursachen einen schnellen Temperatur- und damit Druckanstieg in den Anlagen bzw. Anlagengebäuden, der das Bedienpersonal, die elektrischen Betriebsmittel, das Schaltanlagengebäude sowie die Versorgungssicherheit gefährden kann.

Der Nachweis der Störlichtbogensicherheit erfolgt üblicherweise durch Versuche in Hochleistungsprüffeldern oder - wo dieses nicht möglich oder praktikabel ist - über Druckberechnungen.

Heutzutage existieren bereits zuverlässige Druckberechnungsverfahren, die den Druckverlauf im Störlichtbogenfall ermitteln können. Hierzu haben sich zwei Arten von Druckberechnungsverfahren in der Praxis als bedeutsam erwiesen, das sogenannte „CFD-Verfahren“, das orts aufgelöste Resultate unter Berücksichtigung von loka-

len Effekten wie z.B. Druckwellen durch Lösung der hydrodynamischen Grundgleichungen mit einem Computational-Fluid-Dynamics-(CFD)-Solver liefert, und das „Standardverfahren“, mit dem man schnell, räumlich gemittelte Druckverläufe durch Lösung eines vereinfachten Gleichungssystems erhält.

Der Anwendungsbereich dieser Verfahren ist bislang eingeschränkt. Dieses bezieht sich insbesondere auf SF₆-isolierte Anlagen mit (luftisolierten) Druckentlastungsräumen, bei denen SF₆-Luft-Strömungen mit variierender SF₆-Konzentration auftreten, und auf Anlagen mit Lichtbogenenergieabsorbern. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist SF₆-Luft-Gemische und Lichtbogenabsorbern in die beiden genannten Druckberechnungsverfahren für allgemeine Anwendungen einzubinden und das Rechenprogramm basierend auf dem Standardverfahren weiterzuentwickeln.

Modellierung von SF_6 -Luft-Gemischen und Lichtbogenenergieabsorbern

Der Schwerpunkt der Beschreibung von SF_6 -Luft-Gemischen liegt bei der Erzeugung und Aufbereitung von Gasdaten bei sich ändernder Gaszusammensetzung des Gemisches. Zur Erzeugung dieser Gasdaten gibt es zwei Möglichkeiten, zum einen die Verwendung von Gasmischungsgesetzen mit temperatur- und druckabhängigen Gasdaten der Komponenten und zum anderen durch die Minimierung der Gibbschen freien Energie aller Komponenten zusammen mit der Lösung der Boltzmann-Gleichung. Bei der ersten Möglichkeit werden Wechselwirkungen einschließlich chemischer Reaktionen zwischen den Gasbestandteilen nicht berücksichtigt. Anhand zweier Beispiele wird demonstriert, dass die Berücksichtigung von Wechselwirkungen und chemischen Reaktionen erforderlich ist.

Um den Rechenaufwand in Grenze zu halten, können die Gasdaten nicht bei jedem Iterationsschritt bei Lösung des Differentialgleichungssystems generiert werden. Sie werden daher in ein dreidimensionales Tabellenwerk mit Referenzwerten in Abhängigkeit von dem Druck, der Temperatur und der Gaszusammensetzung (SF_6 -Massenanteil) aufgenommen.

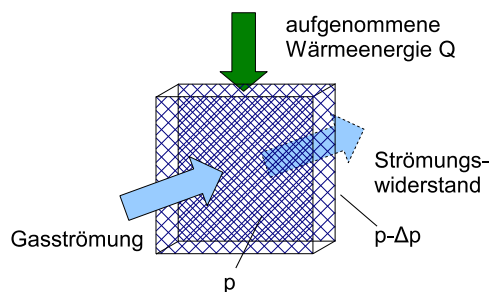


Abb. 1: Wirkung von Absorbern

Lichtbogenenergieabsorber haben in zweierlei Weise Einfluss auf den Druckverlauf, einmal über die Wärmeaufnahme und

zum anderen über den Strömungswiderstand (Abb. 1). Zur Beschreibung dieser Effekte werden verschiedene bestehende sowie neu eingeführte Modellansätze analysiert.

Implementierung von Gasgemischen und Lichtbogenenergieabsorbern in das CFD- und Standardverfahren

CFD-Verfahren

Bei der Druckberechnung werden die Gasdaten der SF_6 -Luft-Gemische dem dreidimensionalen Tabellenwerk entnommen. Zwischenwerte werden durch Interpolation generiert. Hierzu wird eine Optimierung des Interpolationsprozesses durchgeführt, um eine schnelle Konvergenz bei den zahlreichen Iterationen beim CFD-Verfahren mit vertretbaren Rechenzeiten zu erhalten. Zur Bestimmung der sich verändernden Gaszusammensetzungen in der Strömungsdomäne wird eine zusätzliche Erhaltungsgleichung für den SF_6 -Massenanteil eingeführt.

Für die Implementierung von Absorbern müssen die aufgenommene Wärmeenergie und der Druckverlust in die hydrodynamischen Grundgleichungen eingebunden werden. Dieses erfolgt durch die Einführung von Wärmesenken in die Erhaltungsgleichung für die Energie bzw. von Reibungskräften in die Impulserhaltungsgleichung.

Standardverfahren

Beim Standardverfahren wird der SF_6 -Massenanteil in das Gleichungssystem direkt eingebunden. Auch hier werden reale Gasdaten in Abhängigkeit von Druck, Temperatur und Gaszusammensetzung verwendet.

Zur Einbindung der Wirkung von Absorbern wird der Gitterwirkungsgrad zur Beschreibung der Wärmeaufnahme gewählt und der Strömungswiderstand durch eine konzentrierte effektive Öffnung nachgebildet. Die absorbierte Wärmeenergie wird in

das Gleichungssystem als Wärmesenke eingeführt, der Strömungswiderstand über die Ausflussziffer.

Basierend auf dem Standardverfahren mit den neu eingeführten Erweiterungen wird ein neues Softwarepaket zur Druckberechnung im Störlichtbogenfall entwickelt (Improved Standard Calculation (ISC)-Verfahren). Das Programm ist in Java programmiert und damit plattformunabhängig.

Validierung

Das CFD- und ISC-Verfahren werden mit der Einbeziehung von SF₆-Luft-Gemischen und Lichtbogenenergieabsorbern validiert. Dieses erfolgt durch Vergleich von experimentellen mit berechneten Druck- bzw. Temperaturverläufen. Insgesamt werden sechs Anordnungen untersucht, deren Abmessungen einen weiten Bereich abdecken, der typischerweise bei Mittelspannungs (MS)-Schaltanlagen mit SF₆-isolierten Lichtbogenräumen auftritt.

Im Folgenden ist beispielsweise ein Vergleich bei einer der untersuchten Anordnungen dargestellt. Sie besteht aus einer kompakten MS-Schaltstation (Abb. 2). Zwischen dem Kabelkeller und dem Transformatorraum ist ein fünfflagiger Absorber installiert. Das Schaltfeld ist einmal mit Luft und einmal mit SF₆ gefüllt (Luft- und SF₆-Versuch; 12,7 kA, 0,76 s bzw. 16 kA, 1 s).

Die Ergebnisse der ISC- und CFD-Verfahren werden mit denjenigen von Messungen verglichen. Beim CFD-Verfahren werden die Modellansätze „fluchtende Rohrbündel“ für den Wärmeübergang und „gekreuzte fluchtende Rohrbündel“ für den Druckverlust verwendet.

In Abb. 3 und 4 sind die Druckentwicklungen im Schaltfeld, Kabelkeller und Transformatorraum beim Luft-Versuch dargestellt.

Der Abb. 5 sind die gemessenen und berechneten Druckentwicklungen im Kabel-

keller beim SF₆-Versuch ohne den Transformatorraum zu entnehmen.

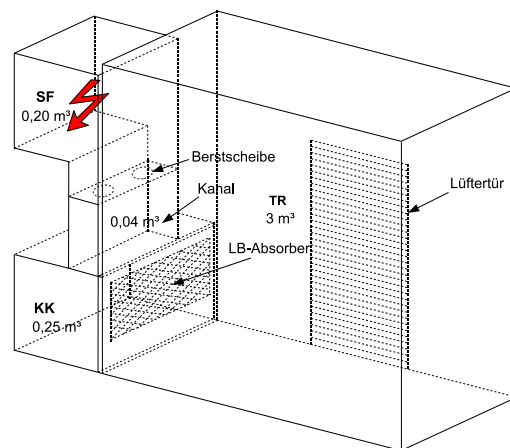


Abb. 2: Schematische Anordnung der MS-Schaltstation mit Nettovolumen (SF: Schaltfeld, KK: Kabelkeller, TR: Transformatorraum)

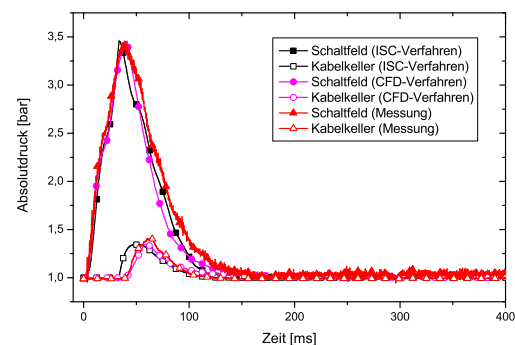


Abb. 3: Gemessene und berechnete Druckentwicklungen im Schaltfeld und Kabelkeller (Luft-Versuch)

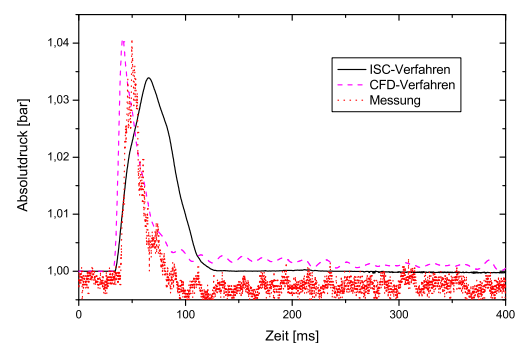


Abb. 4: Gemessene und berechnete Druckentwicklungen im Transformatorraum (Luft-Versuch)

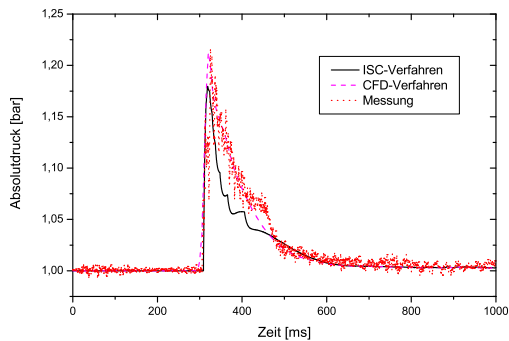


Abb. 5: Gemessene und berechnete Druckentwicklungen im Kabelkeller ohne den Transformatorraum (SF₆-Versuch)

Die Ergebnisse der Validierung für das CFD- und ISC-Verfahren können wie folgt zusammengefasst werden:

CFD-Verfahren

Bezüglich SF₆-isolierter Schaltanlagen liefert das CFD-Verfahren zuverlässige Ergebnisse. Für einen breiten Anwendungsbereich sind reale Gasdaten von Gemischen zu verwenden, die Wechselwirkungen einschließlich chemischer Reaktionen erfassen.

Um die Wärmeaufnahme und den Strömungswiderstand von Absorbern gleichzeitig zu beschreiben, werden aufgrund der praktischen Anwendbarkeit zwei Kombinationen von Ansätzen vorgeschlagen. Die erste Kombination (Gitterwirkungsggradansatz für die Wärmeaufnahme und eine effektive Öffnung für den Strömungswiderstand) eignet sich, wenn Messdaten vorhanden sind, wenn nicht wird eine zweite Kombination (fluchtende Rohrbündel für den Wärmeübergang und gekreuzte fluchtende Rohrbündel für den Strömungswiderstand) empfohlen.

ISC-Verfahren

Generell liefert das ISC-Verfahren zuverlässige Ergebnisse solange Druckwellen und Gasströmungen den Druckverlauf nicht dominieren.

Zusammenfassung

Die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit betreffen die Modellierung und Einbindung von SF₆-Luft-Gemischen sowie die Einbindung der Wirkung von Lichtbogenenergieabsorbern in die Druckberechnungsverfahren (CFD- und Standardverfahren) für allgemeine Anwendungen.

Der Schwerpunkt bei der Modellierung von SF₆-Luft-Gemischen liegt in der Berücksichtigung von Gasgemischeigenschaften bei sich änderndem Mischungsverhältnis während der Ausströmung von SF₆ in umgebende Luft. Hierzu muss die Gaszusammensetzung während der Berechnung bestimmt werden. Um alle wichtigen Effekte, die Einfluss auf die Druckentwicklung haben, zu berücksichtigen, werden reale Gasdaten verwendet. Die Einbindung von SF₆-Luft-Gemischen in die beiden betrachteten Druckberechnungsverfahren führt zu zuverlässigen Rechenergebnissen.

Lichtbogenenergieabsorber beeinflussen den Druckverlauf durch Wärmeaufnahme und deren Strömungswiderstand. Zur Beschreibung der beiden Wirkungen werden bestehende Ansätze analysiert und verbessert. Die Einbindung beider Wirkungen in die Druckberechnungsverfahren erfolgt durch Berücksichtigung von Wärmesenken und Reibungskräften. Damit erhält man zuverlässige Resultate.

Basierend auf dem Standardverfahren zusammen mit der Einbindung von Gemischen und Absorbern wird ein plattformunabhängiges Rechenprogramm entwickelt, das schnell Resultate liefert, einfach zu handhaben ist und einen weiten Einsatzbereich umfasst.

Kontakt

Dr.-Ing. Kittipong Anantavanich
kittipong.a@egat.co.th
+66 2 436 1312

Modellierung des typspezifischen Störungsaufkommens von Hochspannungs-Schaltgeräten

Dissertation: Dipl.-Ing. Stefan Federlein

Tag der mündlichen Prüfung: 29. April 2010

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

Im Rahmen eines effizienten Asset Managements soll Netzbetreibern in Zukunft ein optimierter Betrieb ermöglicht werden. Hierfür muss Wissen über das altersabhängige Störungsaufkommen von Betriebsmitteln in die Software-Werkzeuge der Netzbetreiber integriert werden, damit auf Basis von belastbaren Prognosen eine Entscheidungshilfe für Netzbetreiber geschaffen wird. In dieser Dissertation wird das typspezifische und altersabhängige Störungsaufkommen unter Berücksichtigung der Instandhaltungsaktivität vollständig modelliert. Am Beispiel von verschiedenen Typen von Leistungsschaltern wird das Alterungsverhalten zunächst bei der Ist-Instandhaltung und anschließend mit verschiedenen Instandhaltungs-Szenarien modelliert und ermittelt.

66

Einleitung und Motivation

Steigender Kostendruck durch regulatorische Vorgaben, Veränderungen in der Erzeugungsstruktur sowie alternde Betriebsmittel und stark dynamische Belastungen stellen die aktuellen Herausforderungen der Netzbetreiber dar.

Die Minimierung der Gesamtkosten bei gleichzeitig hoher Versorgungsqualität ist das Ziel der Netzbetreiber. Die optimale Auslastung der Betriebsmittel sowie die Bestimmung deren maximaler Nutzungsdauer sind dabei die entscheidenden Aspekte in diesem Optimierungsprozess. Eine wesentliche Voraussetzung hierfür ist umfangreiches Wissen über die Betriebsmittel, deren typspezifisches Verhalten bei gegebener Netzbelastung sowie der Einfluss der Instandhaltungsstrategie auf das Störungsgeschehen.

Wesentliches Ziel dieser Arbeit ist die Modellierung des altersabhängigen

Störungsaufkommens von Hochspannungs-Schaltgeräten unter Berücksichtigung der Instandhaltung. Daher steht insbesondere der Zusammenhang zwischen Störungsaufkommen und Ausprägung der Instandhaltungs-Aktivität im Fokus dieser Arbeit. Die Betrachtungsweise dieser Arbeit richtet sich somit nicht auf ein Gesamtsystem, sondern lediglich auf bestimmte Hochspannungs-Betriebsmittel (123 und 245 kV Freiluft-Leistungsschalter).

Datenbasis

Vor Beginn der Modellierung wird in Zusammenarbeit mit deutschen Netzbetreibern eine Datenbank aufgebaut, die im Wesentlichen Informationen zu Freiluft-Schaltgeräten – wie z.B. technische Daten, Störungen, Betriebszeiten, Instandhaltungsdaten – beinhaltet. Anschließend werden fünf unterschiedliche Leistungsschalter-Typen identifiziert, deren

verfügbare Daten der Modellierung und der exemplarischen Anwendung genügen.

Zusätzlich werden die in vorherigen Analysen nicht berücksichtigten Ergebnisse aus Instandhaltungs-Protokollen systematisch erfasst und ausgewertet. Die während einer Instandhaltungsmaßnahme inspezierten Schäden stehen nun in Form von sogenannten Bitmasken zur Verfügung, die den Zustand zum IH-Zeitpunkt beschreiben.

Störungsaufkommen bei Ist-Instandhaltung

Die Ermittlung des Alterungsverhaltens bei der aktuell durchgeführten Instandhaltung bildet die Basis zur weiteren Modellierung des Störungsgeschehens. Aufbauend auf empirischen Erkenntnissen wird daher zuerst das altersabhängige Störungsaufkommen bei Ist-Instandhaltung modelliert und für fünf Leistungsschalter-Typen interpretiert. Die resultierenden Alterungsmodelle werden durch eine Badewannen-Charakteristik geprägt (siehe Abb. 1); dabei konnten die typspezifischen Unterschiede deutlich herausgestellt werden.

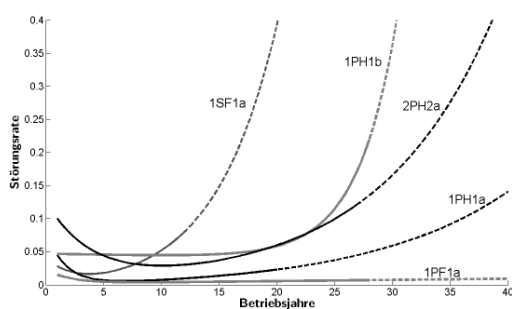


Abb. 1: Störungsaufkommen verschiedener Leistungsschalter bei Ist-Instandhaltung

Die Einlaufphase der Leistungsschalter erstreckt sich auf ein Zeitfenster von zwei bis acht Jahren. Mit einer Ausnahme beginnen die Alterungs- und Verschleißerscheinungen durchschnittlich zwischen 10 und

15 Jahren und können anschließend möglicherweise extrem ansteigen. Die durchschnittliche Störungsrate liegt bei zwei bis acht Störungen pro 100 Leistungsschalter-Jahren.

Entwicklung eines Schadens zu einer Störung – m2M-Modell

Mit Hilfe eines neuen Modells soll nun der Zusammenhang zwischen Störungsaufkommen und Instandhaltungs-Aktivität abgebildet werden.

Basierend auf heuristischem Wissen (Expertenwissen), inspezierten Schäden bei Instandhaltungsmaßnahmen sowie dem Ist-Störungsaufkommen kann mit dem sogenannten *m2M-Modell*¹ der Einfluss einer aufgeschobenen Instandhaltungsmaßnahme auf das Störungsaufkommen ermittelt werden. Dabei wird das Expertenwissen in Form von gestutzten Weibull-Verteilungen mathematisch formuliert und geht als zeitabhängige Störungswahrscheinlichkeit in die Modellierung ein. Der wahrscheinlichkeitstheoretische Übergang von einem Schaden zu einer Störung (m2M) basiert auf einem zeitabhängigen und nicht-regenerativen Zufallsprozess.

Somit werden im m2M-Modell die üblicherweise entdeckten Schäden durch einen möglichen Verzug einer Instandhaltungsmaßnahme nicht behoben und können sich somit in der Folgezeit (Zeit nach der ursprünglich geplanten Instandhaltungsmaßnahme) zu einer Störung entwickeln. Nach Überschreitung des üblichen Instandhaltungsintervalls ergibt sich das resultierende Gesamtstörungsaufkommen $\lambda'(t)$ aus der Überlagerung des bisherigen Störungsgeschehens $\lambda(t)$ mit den zusätzlichen Störungen $\Delta\lambda(t)$ infolge von nicht behobenen Schäden. Damit folgt

$$\lambda'(t) = \lambda(t) + \Delta\lambda(t) = \lambda(t) + \sum_{i=1}^n \Delta\lambda_i(t)$$

¹m2M: minor to Major failure

Dabei bezeichnet n die maximale Anzahl der verschiedenen Schadentypen i . Mit Hilfe der gestutzten Weibull-Verteilungen auf Basis des Expertenwissens können die Wahrscheinlichkeiten $p_i(t)$ für einen Störungseintritt zum Zeitpunkt t berechnet werden. Für $\Delta\lambda_i(t)$ ergibt sich damit

$$\Delta\lambda_i(t) = p_i(t) \cdot \prod_{j=1}^{t-1} (1 - p_i(j)) \cdot h_{i, \text{IHM}}$$

Hier beschreibt der zweite Faktor die Wahrscheinlichkeit, dass der Schaden im Zeitraum vor dem Zeitpunkt t noch nicht zu einer Störung geführt hat (nicht-regenerativer Prozess). Die Schadenhäufigkeit wird mit $h_{i, \text{IHM}}$ bezeichnet und gewichtet das Auftreten der Störung entsprechend.

Störungsaufkommen unter Variation der Instandhaltung

In dieser Arbeit wurden 14 IH-Szenarien betrachtet. Die Instandhaltungsverzüge (in Jahren) beziehen sich dabei immer auf das Basisszenario 0/0 mit einem Inspektionsintervall von zwei und einem Wartungsintervall von acht Jahren. Infolgedessen ergeben sich zum Beispiel für das Szenario 1/2 Inspektionszyklen von drei und Wartungszyklen von zehn Jahren.

Abb. 2 zeigt das Alterungsverhalten beispielhaft für drei Szenarien. Es ist deutlich zu erkennen, dass ein geringer IH-Verzug zu einem deutlichen Störungsanstieg führt (Szenario 1/2). Weiterhin ist festzustellen, dass bei einem Szenario mit extrem großen Verzügen (Szenario 4/8) die Störungsrate überproportional zur Ausdehnung der Intervalle stärker ansteigt. Der Grund für diesen Effekt sind Schäden, die eine längere m2M-Entwicklung aufweisen und sich somit erst bei großen IH-Verzügen zu Störungen entwickeln können. Bei kleinen Verzügen wirken sich diese Schäden nicht negativ auf das Störungsaufkommen aus.

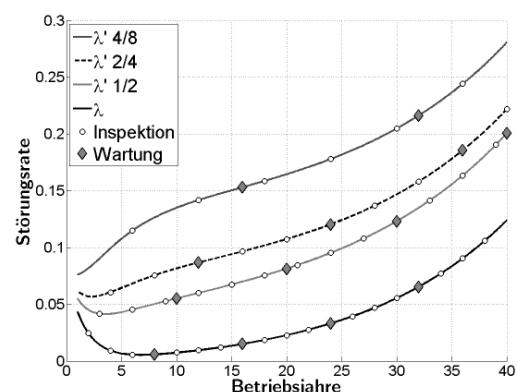


Abb. 2: Instandhaltungsszenarien für einen 123-kV-Leistungsschalter

In Abbildung 3 und 4 werden die betrachteten Szenarien gegenüber gestellt. Dabei sind die zu erwartenden Veränderungen im Störungsaufkommen sowie im IH-Aufwand (=Fixkosten) in Bezug zum Basisszenario 0/0 dargestellt. Unter Berücksichtigung des ohnehin sehr geringen Störungsaufkommens der Schalter ist das Szenario 2/4 sehr effizient. Das Störungsaufkommen steigt zwar auf das Dreifache an, jedoch kann der Aufwand um 45% reduziert werden.

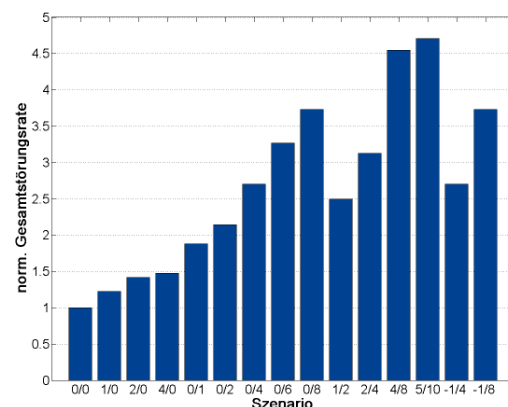


Abb. 3: Gesamtstörungsaufkommen in unterschiedlichen IH-Szenarien

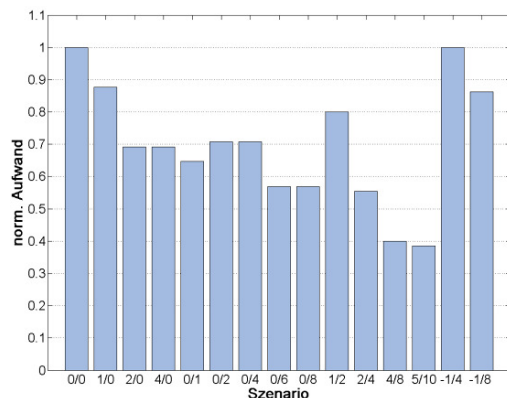


Abb. 4: Gesamtaufwand in unterschiedlichen IH-Szenarien

Die Anwendung des m2M-Modells am Beispiel von drei Leistungsschalter-Typen führt zu plausiblen Ergebnissen und es lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen ableiten.

Tendenziell ist die Ausdehnung der Instandhaltungsintervalle im Hinblick auf das erhöhte Störungsaufkommen vertretbar. Jedoch müssen die typspezifischen Unterschiede der Schalter berücksichtigt werden. In Abhängigkeit der technischen Merkmale können auch schon geringe Verzögerungen bestimmter Instandhaltungsmaßnahmen zu einem großen Störungspotential führen.

Unabhängig von den Schaltertypen ist eine Effizienzsteigerung durch die Ausdehnung des Inspektionsintervalls schnell erreichbar. Die Inspektion kann bei den hier untersuchten Schaltern nur wenige kritische Schäden erkennen und ist dadurch wenig effektiv.

Des Weiteren hat die Schadensanalyse gezeigt, dass gerade bei der ersten Wartung tendenziell viele Schäden entdeckt werden, die zum Teil noch auf die Zeit der Inbetriebnahme zurück zu führen sind. Hier bietet es sich an, die erste Wartung (im achten Betriebsjahr) beizubehalten und lediglich die folgenden Wartungszyklen zu strecken, um

das Störungspotential nicht schon in den jungen Betriebsjahren auszureizen.

Fazit

In dieser Arbeit wird erstmalig ein Modell entwickelt, das den Übergang von einem Schaden zu einer Störung (m2M) nachbildet. Diese Modellierung ermöglicht eine Prognose des Störungsaufkommens bei veränderter Instandhaltungsaktivität. Das m2M-Modell wird auf seine Anwendbarkeit am Beispiel von Leistungsschaltern überprüft und steht Netzbetreibern – je nach Datenverfügbarkeit – auch für andere Betriebsmittel zur Verfügung.

Somit ist es möglich, den Netzbetrieb von Energieversorgern durch angepasste Instandhaltungsstrategien nachhaltig zu optimieren.

Quellen

- [1] S. Federlein, C. Hille; C. Neumann, B. Rusek, A. Schnettler: *Nutzung historischer Instandhaltungsinformationen zur Modellierung des Betriebsmittelverhaltens*. Internationaler ETG-Kongress, FT4 - 5.1, Düsseldorf 2009
- [2] S. Federlein, C. Hille, A. Gaul, A. Schnettler: *New methods to assess the impact of maintenance and the condition of network*. CIRED 2009, Session 1, No. 0870, Prague (Czech Republic) 2009

Kontakt

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

Einsatz elastischer syntaktischer Schäume in der Hochspannungstechnik

Dissertation: Dr.-Ing. Michael Keßler

Tag der mündlichen Prüfung: 02. Juli 2010

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

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Volker Hinrichsen

Neben der stets geforderten Zuverlässigkeit und langen Lebensdauer von Isoliersystemen müssen diese in der Zukunft eine höhere Kompaktheit, eine geringere Dichte und eine Zusammensetzung aus umweltfreundlichen Komponenten aufweisen. Ein Feststoff ist im Gegensatz zu flüssigen oder gasförmigen Isolierstoffen unempfindlich gegen Leckagen des Gehäuses und wirkt somit nicht umweltgefährdend im Fehlerfall. Ist dieser Isolierstoff zudem elastisch und kompressibel, so wird er unempfindlich gegenüber thermischen Lastzyklen, die bei herkömmlichen Feststoffisolierungen zu Rissbildung führen können. Elastische syntaktische Schäume stellen ein solches Isoliermaterial mit den geforderten Eigenschaften dar. Sie bestehen aus einer Silikonmatrix mit eingebrachten, gasgefüllten Mikrohohlkugeln mit einem mittleren Durchmesser von einigen 10 µm als Füllstoff. Im Rahmen dieser Arbeit werden mechanische und physikalische Eigenschaften elastischer syntaktischer Schäume in Abhängigkeit der Zusammensetzung betrachtet. Ein Schwerpunkt hierbei liegt auf den elektrischen Eigenschaften dieses Materials im Kurzzeitbereich, mit dem Ziel der Entwicklung eines Modells des elektrischen Durchschlags. Die Untersuchungen zeigen, dass Entladungen in der Regel im Silikonelastomer verlaufen, so dass insgesamt im Kurzzeitbereich bei Gleich- und Wechselspannung von einem elektrischen Durchschlag in der Silikonmatrix ausgegangen werden kann.

Einleitung und Motivation der Arbeit

Es besteht eine Reihe unterschiedlicher Anforderungen an moderne Isoliersysteme in der Hochspannungstechnik. Neben der elektrischen Alterung stellt insbesondere die thermische Beanspruchung eine Herausforderung dar. Thermische Lastzyklen infolge von veränderten Witterungsbedingungen oder in Abhängigkeit der veränderlichen elektrischen Belastung führen zu mechanischen Spannungen im Isoliersystem. Dies gilt insbesondere, wenn verschiedene Materialien mit unterschiedlichen Temperatúrausdehnungskoeffizienten kombiniert werden. Hierbei kann es im Bauteil zu Rissbildungen oder Ablösungen

des Isoliermaterials und schließlich zum Versagen der Isolierung kommen.

In den Hoch- und Höchstspannungsebenen werden derzeit häufig gasförmige Isolierungen, z.B. Schwefelhexafluorid (SF₆), oder flüssige Isolierungen, wie Transformatoröl, verwendet. Ein gravierender Nachteil besteht aber in der Notwendigkeit eines Dichtsystems, da ein Austreten des Isolierstoffs zum einen umweltgefährdend sein kann und zum anderen das Isolationsvermögen herabsetzt, mit dem möglichen Ausfall der Komponente als Konsequenz.

Ein fester Isolierstoff kann die oben genannten Probleme vermeiden helfen (sog. „trockener“ Isolierstoff [1]). Für feste Iso-

lierstoffe stellen aber wiederum die bereits erwähnten Temperaturgradienten eine Gefahr dar. Abhilfe schafft ein Isoliermaterial, das im flüssigen Zustand vergossen wird und im Bauteil mit einem geringen Volumenschwund zum Feststoff aushärten kann. Eine hohe Elastizität, Kompressibilität und ein ausgeprägtes Adhäsionsvermögen des Feststoffes helfen hierbei, die thermischen Lastspiele auszugleichen. Elastische syntaktische Schäume gehören zu diesen Materialien. Sie bestehen aus einem niederviskosen Silikongel als Matrix und Kunststoffmikrohohlkugeln mit einer Größe von einigen 10 µm als Füllstoff. Abb. 1 zeigt eine ESEM (Environmental Scanning Electron Microscopy) Aufnahme eines elastischen syntaktischen Schaums. Dieses Material kombiniert eine exzellente Adhäsion zu Kunststoff- und Metalloberflächen und eine ausgeprägte Elastizität des Silikongels mit der Kompressibilität der gasgefüllten Mikrohohlkugeln.

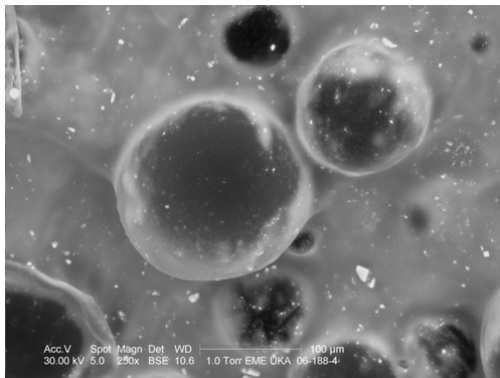


Abb. 1: ESEM Aufnahme eines elastischen syntaktischen Schaums [2]

Ein neues Anwendungsgebiet stellt der Einsatz des elastischen syntaktischen Schaums in Zündsystemen dar. Durch die steilen Temperaturgradienten im Bereich des Motorraums beim Starten des Motors sowie beim Kontakt mit Spritzwasser im Winter während der Fahrt kommt es zu erheblichen Temperaturspannungen an diesen Bauteilen, die letztlich bei Verwendung von klassischen Expoxidharzisolie-

rungen zur Rissbildung des Gehäuses führen können.

Kurzzeitspannungsfestigkeit

Ein Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Bestimmung der Kurzzeitspannungsfestigkeit des elastischen syntaktischen Schaums für Gleich- und Wechsellspannung in Abhängigkeit verschiedener Parameter. Hierfür wird eine eingegossene Kugel-Kugel-Elektrodenkonfiguration (Elektroden Durchmesser 12 mm, Schlagweite 3 mm) verwendet. Die Auswertung erfolgt mittels 95 % Konfidenzintervalls. Für Wechsellspannung werden die Scheitelwerte herangezogen. Für elastische syntaktische Schäume auf Basis von mit Kalziumkarbonat beschichteter Mikrohohlkugeln als Füllstoff ergibt sich für Wechsellspannung mit steigendem Füllgrad eine tendenzielle Verbesserung der Kurzzeitspannungsfestigkeit (Abb. 2).

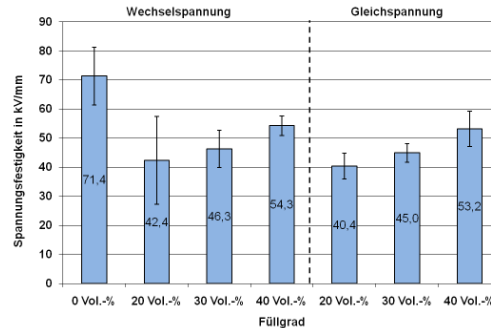


Abb. 2: Spannungsfestigkeit elastischer syntaktischer Schäume in Abhängigkeit des Füllgrads

Da sich die Vertrauensintervalle aber größtenteils überlappen, kann keine statistisch gesicherte Aussage getroffen werden. Auffällig ist die große Streuung bei den Wechsellspannungsversuchen mit den Schaumproben bei 20 Vol.-% Füllgrad. Im Vergleich zu reinem Silikongel (0 Vol.-% in Abb. 2) liegen die Werte für die elastischen syntaktischen Schäume generell um etwa 25 % niedriger. Im Mittel werden im Wechsellspannungsversuch für reines Silikongel Scheitelwerte von 71,4 kV/mm er-

reicht. Für die Gleichspannungsversuche ergibt sich ein ähnlicher Trend von höheren mittleren Spannungsfestigkeiten hin zu höheren Füllgraden.

Den Einfluss einer anorganischen Beschichtung auf die Spannungsfestigkeit zeigt Abb. 3. Betrachtet werden mit Kalziumkarbonat beschichtete (mittlerer Durchmesser 90 μm) und unbeschichtete (ca. 80 μm) Mikrohohlkugeln, jeweils mit einem Füllgrad von 40 Vol.-%. Die mittlere Spannungsfestigkeit für Schäume mit beschichteten Kugeln beträgt bei Wechselspannung 54,3 kV/mm und liegt etwa 76 % über der mittleren Spannungsfestigkeit bei Verwendung unbeschichteter Kugeln. Bei Gleichspannung erreichen beschichtete Mikrohohlkugeln sogar eine 93 % höhere mittlere Spannungsfestigkeit als unbeschichtete Mikrohohlkugeln.

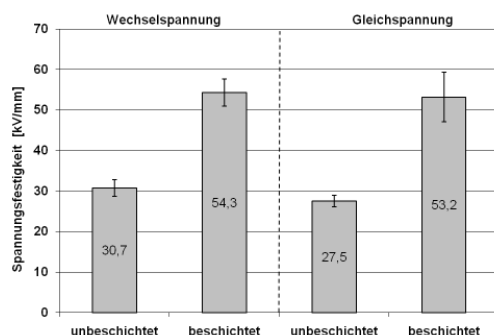


Abb. 3: Spannungsfestigkeit elastischer syntaktischer Schäume in Abhängigkeit der Beschichtung

Untersuchungen an definierten Mikrohohlkugelanordnungen

Optische Untersuchungen bilden eine weitere wichtige Stütze zur Entwicklung eines Durchschlagsmodells für Gleich- und Wechselspannung. Sie geben Aufschluss über Ursprungsort und Verlauf von Entladungskanälen. Die Untersuchungen werden an reinem Silikongel mit beschichteten Mikrohohlkugeln durchgeführt. Für einen leichteren Herstellungsprozess wer-

den besonders große Mikrohohlkugeln mit einem mittleren Durchmesser von etwa 200 μm zur Erzeugung der Strukturen verwendet. Abb. 4 zeigt beispielhaft eine Mikrohohlkugelreihe in einer Spitze-Spitze-Elektrodenkonfiguration. Abb. 5 zeigt den Durchschlagskanal. Hierbei wird ein Stufentest durchgeführt beginnend bei 15 kV Gleichspannung, die jede Minute um 2 kV erhöht wird, bis der Durchschlag erfolgt. Erkennbar ist, dass der Durchschlagskanal an Mikrohohlkugeln entlang verläuft. Obwohl die Mikrohohlkugeln zwischen den Spitzen der Elektroden zentriert und somit genau auf der Achse der höchsten Feldstärke positioniert sind, entwickelt sich der Entladungskanal nicht durch die Mikrohohlkugeln hindurch, sondern schiebt diese beiseite. Weitere optische Untersuchungen zeigen, dass sich der Durchschlagskanal im Kurzzeitbereich grundsätzlich im Silikongel entwickelt, unabhängig davon, ob eine homogene oder inhomogene Elektrodenanordnung eingesetzt wird.

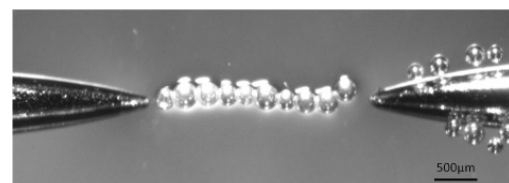


Abb. 4: Mikrohohlkugelanordnung in Silikongel

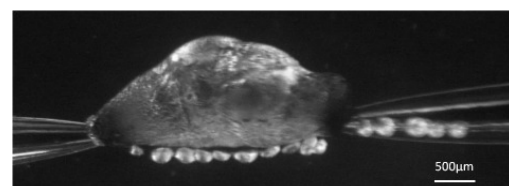


Abb. 5: Mikrohohlkugelanordnung nach Durchschlag

Zur Bestimmung der Feldverteilung in einfachen Mikrohohlkugelanordnungen werden Simulationen mittels eines dreidimensionalen Simulationstools nach der Finite Elemente Methode (FEM) berechnet. Es kommt eine automatische, adaptive Meshtechnologie mit Tetraederelemen-

ten zum Einsatz. Simuliert wird bei einer homogenen Hintergrundfeldstärke von 20 kV/mm, da dieser Wert gerade noch unterhalb der vom Hersteller angegebenen Spannungsfestigkeit von reinem Silikongel liegt. In Abb. 6 werden die Feldstärken in Schnittbildern durch die Kugelmittelpunkte einer Mikrohohlkugelmatrix dargestellt. Die äußere Feldrichtung $\vec{E}_{a,\infty}$ ist von links nach rechts gerichtet.

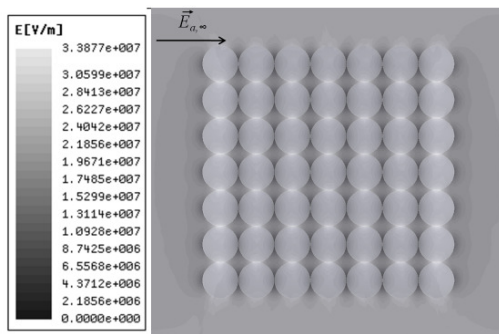


Abb. 6: Simulation der Feldstärke in Mikrohohlkugelmatrix

Zu erkennen ist, dass die maximal auftretende Feldstärke einer Anreicherung in Feldrichtung von etwa 25 kV/mm an den äußeren Mikrohohlkugeln anliegt. Im Zwischenraum der Mikrohohlkugeln geht die Feldstärke lokal allerdings bis auf etwa 15 kV/mm zurück. Wird die Anreicherung an Mikrohohlkugeln senkrecht zum elektrischen Feld betrachtet, zeigt sich, dass sich links und rechts der Reihe eine Zone befindet, in der das elektrische Feld bis auf etwa 10 kV/mm geschwächt wird. Unmittelbar zwischen den Mikrohohlkugeln steigt die Feldstärke allerdings lokal deutlich an. Somit kann lokal die Spannungsfestigkeit von Silikongel überschritten werden.

Durchschlagsmechanismus

Ausgehend von lokalen Feldstärkeüberhöhungen im Silikongel bedingt durch die Mikrohohlkugeln findet eine lokale Entladung im Silikongel statt. Der Entladungsprozess im Silikongel selbst erfolgt nach dem aus der Literatur bekannten Prozess der Kettenaufspaltung durch im Gaska-

nal beschleunigte Elektronen [3]. Trifft die Entladung auf eine mit einem anorganischen Material beschichtete Mikrohohlkugel, kann die Entladung zunächst aufgehalten werden. Ein Aufblähen des Entladungskanals bedingt durch den Druckanstieg im Kanal und der Elastizität des Silikongels wird bei höheren Füllgraden an Mikrohohlkugeln verhindert. Kann sich die Entladung um die Mikrohohlkugeln herum fortsetzen und überbrückt schließlich die gesamte Isolationsstrecke, so zerstört die stromstarke elektrische Entladung die thermoplastischen Kunststoffhüllen der Mikrohohlkugeln thermisch. Dieses Durchschlagsmodell ist sowohl bei Wechsel- als auch bei Gleichspannung gültig, da die Untersuchungen für beide Spannungsarten vergleichbare Ergebnisse liefern.

Quellen

- [1] R. Eitle, J. Kaumanns: *Trockene Freiluftendverschlüsse mit Stützeigenschaft*, Fachbeitrag aus Elektrizitätswirtschaft; Heft 11.2000
- [2] M. Keßler: *Einsatz elastischer syntaktischer Schäume in der Hochspannungstechnik*, Aachener Beiträge zur HOCHSPANNUNGSTECHNIK Band 16, Verlagshaus Mainz GmbH, 2010
- [3] J. Oesterheld: *Dielektrisches Verhalten von Silikonelastomer-Isolierungen bei hohen elektrischen Feldstärken*, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 21 Nr.196, Düsseldorf VDI Verlag, 1996

Kontakt

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

Widerstandsverteilung in Schaltlichtbögen von Selbstblasleistungsschaltern während der Stromnulldurchgangsphase

Dissertation: Dr.-Ing. Ming Chark Tang, MBA

Tag der mündlichen Prüfung: 05. März 2010

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

Selbstblasleistungsschalter sind wesentliche Schalt- und Sicherheitselemente im Hochspannungsnetz der elektrischen Energieversorgung. Während des Ausschaltvorganges des Selbstblasleistungsschalters wird ein elektrischer Lichtbogen zwischen den sich öffnenden Schaltkontakten generiert, welcher den Strom im Schalter weiterführt. Erst eine Beblasung mit einem Löschgas und somit eine Kühlung dieses Schaltlichtbogens während der Stromnulldurchgangsphase überführt die Schaltstrecke vom leitfähigen in den isolierenden, ausgeschalteten Zustand. Die zeitliche Widerstandsentwicklung des Schaltlichtbogens ist hierbei ein für das Ausschaltvermögen charakteristischer Prozess. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine geeignete Messanordnung zur Bestimmung der Widerstandsverteilung innerhalb der Schaltstrecke während der Stromnulldurchgangsphase entwickelt und in eine Modellbildung für einen Selbstblasleistungsschalter integriert. Zur Analyse der physikalischen Vorgänge werden Computational Fluid Dynamics Simulationen durchgeführt, um die Kühlmechanismen des Schaltlichtbogens zu evaluieren und um diese Kühlprozesse der Widerstandsverteilung zuzuordnen. Durch eine detaillierte Kenntnis über die Widerstandsentwicklungen mit den Löschgasen SF_6 und CO_2 wird das Verständnis der Vorgänge während der Stromnulldurchgangsphase verbessert. Hierdurch wird eine weitere Optimierung von Gasleistungsschaltern möglich.

Widerstandsentwicklung in Leistungsschaltern

Während der Stromnulldurchgangsphase eines Selbstblasleistungsschalters sinkt der Strom bis zum Stromnulldurchgang. Demzufolge reduziert sich die in dieser Zeit umgesetzte ohmsche Heizleistung im Schaltlichtbogen. Insbesondere in der letzten Mikrosekunde übersteigt die Leistungsabgabe des Lichtbogens die der zugeführten ohmschen Heizleistung. Der Widerstand des Schaltlichtbogens steigt aufgrund der Kühlmechanismen stark an und besitzt in dieser Phase die höchste Steigung im Wi-

derstandsverlauf (siehe Abb. 1). Nach dem Stromnulldurchgang wird aufgrund der transienten wiederkehrenden Spannung ein Nachstrom durch die Schaltstrecke getrieben. Der Widerstand des Schaltlichtbogens steigt unmittelbar nach Stromnull weiter an, da die zugeführte Leistung immer noch geringer ist als die Kühlleistung. Kehrt sich das Verhältnis von zugeführter und abgeführter Leistung zum Zeitpunkt des Widerstandsmaximums um, so wird die Schaltstrecke wieder aufgeheizt und der Ausschaltvorgang des Kurzschlussstromes ist erfolglos. Im umgekehrten Fall der höheren Leistungsabfuhr erhöht sich der Widerstand

der Schaltstrecke bis hin zu einem isolierenden Zustand. Der Kurzschlussstrom wird somit erfolgreich unterbrochen.

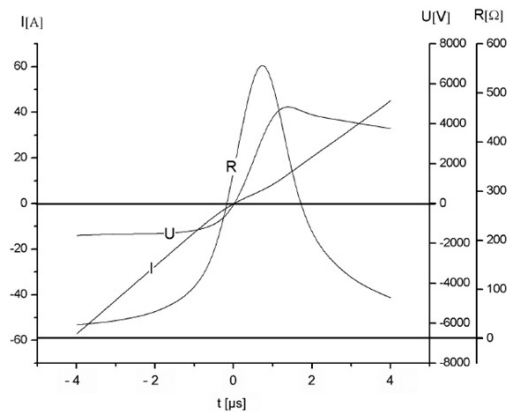


Abb. 1: Verlauf von Strom, Spannung und Widerstand in der Stromnulldurchgangsphase und der Nachstromphase [1]

Die Widerstandsentwicklung während der Stromnulldurchgangsphase wird derzeit als örtlich integrale Größe verstanden und auch als Bewertungskriterium von Leistungsschaltern eingesetzt. Jedoch bestehen nur unzureichende Informationen über deren örtliche Verteilung und der physikalischen Zusammenhänge. Durch eine genaue Kenntnis der Widerstandsverteilung und der relevanten Kühlmechanismen ist eine gezielte Optimierung des Leistungsschalters mit verschiedenen Löschgasen möglich.

Konzept der Untersuchungen

Das Konzept der Arbeit ist in Abb. 2 veranschaulicht. Die Analyse der Widerstandsentwicklung und -verteilung und deren Zuordnung zu einem physikalischen Kühlmechanismus müssen in eine geeignete Prüfanordnung überführt werden. Einflüsse anderer Parameter müssen minimiert werden, so dass die eigentlichen Kerneffekte ausgewertet werden können. Mit Hilfe der Prüfanordnung wird ein zweigeteilter Ansatz aus experimentellen und simulativen Untersuchungen verfolgt. Die Experimente stellen unter anderem die Verifikation der Si-

mulationsmodelle sicher und die Simulationen liefern eine Auswertung von physikalischen Parametern, welche der Messanordnung nicht zur Verfügung stehen. Die Evaluierung umfasst die Diskussion der experimentellen und simulativen Ergebnisse zum einen und den Vergleich des Ausschaltverhaltens der beiden untersuchten Gase SF_6 und CO_2 zum anderen.

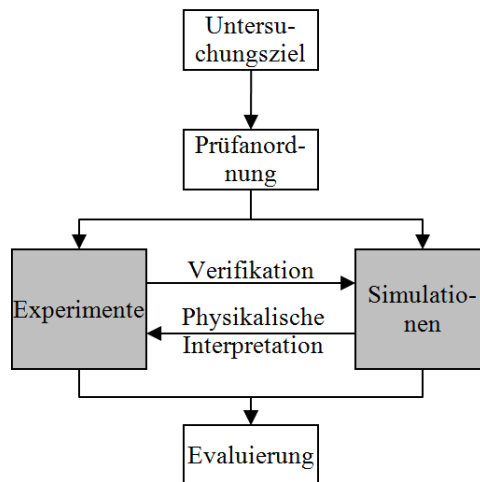


Abb. 2: Schematische Darstellung des Untersuchungskonzepts

Für die Experimente wird ein Selbstblasleistungschaltermodell verwendet, welches die in aktuellen Schaltern eingesetzte zylindrische Düsenform aufweist. Durch im Leistungsschaltermodell integrierte Messanordnungen soll ein Rückschluss auf die Widerstandsverteilung des Schaltlichtbogens und eine Übertragung der physikalischen Vorgänge ermöglicht werden. Die Messanordnung ist so ausgelegt, dass sie einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Vorgänge während der Stromnulldurchgangsphase nimmt. Ebenso ist die Messtechnik so dimensioniert, dass die sehr schnellen Vorgänge zeitlich aufgelöst werden können.

Das Simulationsmodell basiert auf einer CFD-Software zur Lösung der Grundgleichungen für die Massenerhaltung (Gl. (1)), der Impulserhaltung (Gl. (2) - (4)) und der Energieerhaltung (Gl. (5)):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u} u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } u) + S_{ix} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u} v) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } v) + S_{iy} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u} w) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } w) + S_{iz} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \text{div}(\rho i \vec{u}) = -p \text{div}(\vec{u}) + \text{div}(\lambda_{\text{cond}} \text{grad } T) + \Phi + S_i \quad (5)$$

unter Einbindung von Turbulenz- und Strahlungsmodellen und einem Solver für das elektrische Feld. Das Leistungsschaltermodell wird in einer Simulationssoftware unter geeigneten Vereinfachungen implementiert, da exakte Berechnungen unter Berücksichtigung aller physikalischen Phänomene nur für stark vereinfachte Anordnungen möglich sind. Das eingesetzte Simulationsmodell ist in der Lage, die Lichtbogenverhältnisse in der Stromnulldurchgangsphase nachzubilden, dies betrifft insbesondere die numerische Diskretisierungsfeinheit im Lichtbogenbereich.

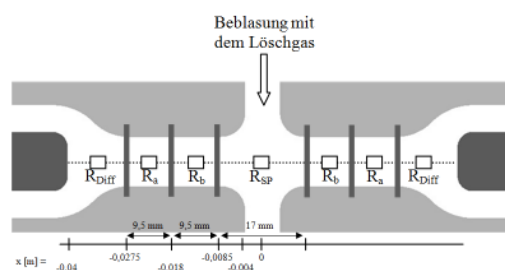


Abb. 3: Schematische Darstellung des Lichtbogenbereichs und Einteilung in diskrete Teilwiderstände

Die Schaltstrecke des Selbstblasleistungs-schaltermodells ist schematisch in Abb. 3 dargestellt. Es handelt sich um ein statisches, rotationssymmetrisches Modell. Auf der linken und auf der rechten Seite der Anordnung befinden sich die Elektroden, zwischen denen der Lichtbogen brennt. In der Mitte der Anordnung wird der Schaltstrecke das Füll- und Löschgas des Leistungsschalters zugeführt und sorgt für eine Beblasung des Lichtbogens. Die gesam-

te Schaltstrecke bzw. ihr Widerstand R_{ges} besteht demnach aus den beiden Diffusorenwiderständen R_{Diff} den Düsenteilwiderständen R_a und R_b sowie dem Widerstand im Stagnationsbereich R_{Sp} .

Untersuchungsergebnisse und Analyse des Ausschaltverhaltens

Zum Vergleich der Stromnulldurchgangsphasen der Selbstblasleistungsschaltermodelle unter Verwendung des Füllgases SF_6 bzw. CO_2 wird der simulierte Lichtbogenzustand 200 ns vor Stromnull für die gleichen Rahmenbedingungen evaluiert (siehe auch [2]). Die Ergebnisse in Form der Temperaturverteilung und ihrem dazugehörigen Verlauf des Widerstandsbelages sind in Abb. 4 gegenübergestellt. Die linke Seite der gestrichelten Linie stellt den SF_6 -Modellschalter dar, die rechte Seite entsprechend den CO_2 -Modellschalter. Während im Stagnationsbereich kein Unterschied in der Temperaturverteilung zu erkennen ist, weitet sich der CO_2 -Lichtbogen im Verlauf der Düse weiter auf. Ebenso liegen ihre Kerntemperaturen oberhalb des entsprechenden Bereiches des SF_6 -Schalters. In der Widerstandsverteilung besitzt der SF_6 -Schalter die höchsten Widerstandsbeläge innerhalb der Düse, beim CO_2 -Schalter befinden sich diese am Stagnationsbereich.

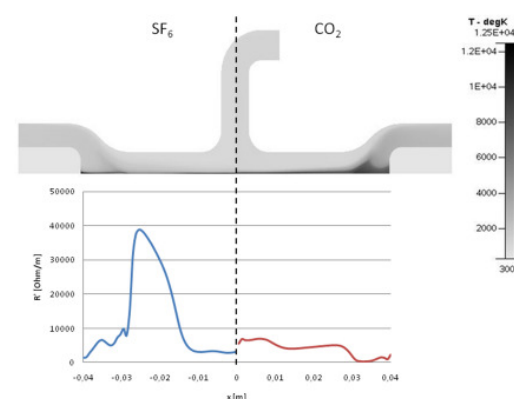


Abb. 4: Vergleich der Temperaturverteilung und des Widerstandsbelages des SF_6 und des CO_2 Schaltermodells

Weiter werden die experimentellen Ergebnisse der Widerstandsverteilung unter Zugrundelegung der simulativen physikalischen Interpretationen betrachtet. Die Beziehungen zwischen den Teilwiderständen und den beiden wesentlichen Kühlmechanismen (konvektive Kühlleistung P_{conv} und turbulente Kühlleistung P_{turb}) können für den **SF₆-Modellschalter** wie folgt angegeben werden:

$$R_{\text{SP}} \approx 2 \cdot (R_a + R_b) \text{ mit } R_a > R_b \quad (5-6)$$

$$P_{\text{conv}} \approx P_{\text{turb}} \quad (5-7)$$

Für den **CO₂-Modellschalter** gilt:

$$R_{\text{SP}} \gg 2 \cdot (R_a + R_b) \text{ mit } R_a < R_b \quad (5-8)$$

$$P_{\text{conv}} \gg P_{\text{turb}} \quad (5-9)$$

Bei der Verwendung von SF₆ im Selbstblasleistungsschaltermodell sind die Widerstände im Stagnationsbereich und in den beiden Düsen etwa gleich, so dass für den Widerstandsaufbau während der Stromnulldurchgangsphase die konvektive und die turbulente Kühlung von gleichrangiger Bedeutung sind. Die turbulente Kühlwirkung ist dabei im hinteren Teil der Düse höher, da diese im vorderen Düsenteil initiiert und erst im Verlaufe der Düse energiereicher werden. Das Verhältnis der Kühlmechanismen gilt insbesondere für die in diesem Fall betrachtete Modellanordnung. Ein verändertes Bild ergibt sich bei Verwendung des Alternativgases CO₂. Hier dominiert der Widerstandsanteil im Stagnationsbereich verglichen mit den beiden Düsenanteilen. Dies betont die Bedeutung der konvektiven Kühlung während des Ausschaltvorganges beim CO₂-Modellschalter. Im Vergleich des Gesamtwiderstandes bei vergleichbaren Rahmenbedingungen ergeben sich sowohl aus den experimentellen als auch aus den simulativen Untersuchungen höhere Widerstandswerte vom SF₆-Schalter als vom CO₂-Schalter. Diese führen zu einem besseren Ausschaltvermögen des SF₆-Leistungsschalters.

Zusammenfassung

Die Arbeit liefert eine detailliertere Vorstellung der physikalischen Vorgänge während der Stromnulldurchgangsphase und der zeitlich und örtlich aufgelösten Widerstandsverteilung. Die Untersuchungen zeigen, dass die Kühlmechanismen in unterschiedlichen Bereichen des Leistungsschalters dominierend wirksam sind. Die höchste konvektive Kühlung bildet sich im Bereich des Stagnationspunktes aus, während die turbulente Kühlung innerhalb der Düsen erfolgt. Zudem zeigt die Arbeit, dass bei Selbstblasleistungsschaltern mit alternativen Gasen andere Widerstandsverteilungen auftreten können. Somit sind die bisher für SF₆-Leistungsschalter entwickelten Erkenntnisse nicht ohne Weiteres auf Alternativgasschalter übertragbar und bedürfen einer Überprüfung und detaillierteren Studien.

Quellen

- [1] C. Kahlen et al.: *Application of a New Measuring System for Investigations of the Interruption Behaviour of a SF₆-Selfblast Circuit Breaker Model*, XVIth Symposium on Physics of Switching Arc, Brno, 2005
- [2] M.-C. Tang: *Widerstandsverteilung in Schaltlichtbögen von Selbstblasleistungsschaltern während der Stromnulldurchgangsphase*, Dissertation RWTH Aachen, Schriftenreihe: Aachener Beiträge zur Hochspannungstechnik, Band 13, ISBN 3-86130-676-X, 2010

Kontakt

Dr. Ming Chark Tang
 ming.chark.tang@nktcables.com
 +49 221 676-2003

HumTec

Modellierung zukünftiger Energieversorgungsszenarien

HumTec ist ein interdisziplinäres Projekthaus der RWTH Aachen, das im Zuge der Exzellenzinitiative von Bund und den Ländern gegründet worden ist. Das Projekthaus hat das Ziel die interdisziplinäre Arbeit zwischen Geistes-, Natur- und Ingenieurwissenschaften zu fördern. Das IFHT stellt dabei neben dem TVT (Institut für Thermische Verfahrenstechnik) in der Forschungsgruppe Ethics for Energy Technology (EET) die ingenieurwissenschaftliche Kompetenz. Die Modelle werden mit Maschinenbauern und Verfahrenstechnikern entwickelt und bilden mögliche globale zukünftige Energieversorgungsszenarien ab.

Projektbeschreibung

Im EET-Projekt soll ein Rahmen für ethisch vertretbare Energieversorgungs- und Technologiepfade modellbasiert abgeleitet werden. Die Ergebnisse werden nicht nur ökologisch und ökonomisch bewertet, sondern sollen auch erstmalig einer sozialen bzw. ethischen Beurteilung unterzogen werden.

Im Fokus des Projektes steht die Entwicklung eines integrated assessment model, das aus mehreren Teilmodulen besteht. Das Modell umfasst eine globale Sichtweise und einen Endzeitpunkt im Jahr 2100. Mit diesem Modell werden globale Zusammenhänge zwischen Bevölkerungsentwicklung, Ressourcenverbrauch, Energiebereitstellung, Landflächennutzung, Klima und Ökonomie abgebildet, wobei die Schwerpunkte je nach Forschungsgruppe unterschiedlich sind. Hierbei wird auch der Einfluss politischer Entscheidungen auf die genannten Aspekte untersucht. Mithilfe des Modells werden Szenarien für den Energiemix berechnet, wobei den verschiedenen Energiebereitstellungspfaden, basierend auf den heutigen Daten und Prognosen, Kosten zugewiesen werden, bezüglich derer der Mix optimiert wird. Zusätzlich werden Technologiegrenzen und Grenzen der Übergänge als Nebenbedingungen berücksichtigt. Aufgrund der wach-

senden Weltbevölkerung und des steigenden weltweiten Lebensstandards sowie der Knappheit fossiler Energieträger ist die Frage nach der zukünftigen Energiebereitstellung in den letzten Jahren immer mehr in den gesellschaftlichen Fokus gerückt. Daher werden im Bereich der Energiemodellierung besonders die Märkte für die fossilen Energieträger betrachtet. Mithilfe des Modells sollen Abbau- und Preispfade der Energieträger nach unterschiedlichen Optimierungskriterien begutachtet werden. Dabei wird auf die drei wichtigsten fossilen Energieträger mit Kohle, Erdgas und Erdöl fokussiert. Die Ressourcenallokation wird in diesem Zusammenhang nach volkswirtschaftlichen Optimierungskriterien vorgenommen. Die Verteilung bzw. Extraktion der Ressourcen findet auf einer globalen Ebene statt, in der die weltweiten Länder zu sechs Weltregionen aggregiert werden, die als autarke Agenten, sowohl als Anbieter als auch als Nachfrager auf der Makroebene auftreten und agieren.

Wichtige Einflussfaktoren sind vor der Modellierung analysiert worden. Dazu zählen unter anderem die Substitutionsmöglichkeiten zwischen fossilen und regenerativen Energieträgern, sowie Abbildung und Einbindung von technologischen Fortschritt, z.B. für weitere Explorationsaufwendungen. Aufgrund der Knappheit fossiler Res-

sources und erwarteten steigenden Preisen für die Energieträger spielen bei dem langen Betrachtungszeiträumen auch die regenerativen Energieträger, in Form von Solarenergie oder Biomasse, eine wichtige Rolle für das Modell. Die Einbindung gesellschaftlicher und sozialer Einflüsse auf die Energieversorgungsstruktur spielt eine immer wichtigere Rolle. Daher werden diese Aspekte verstärkt berücksichtigt. Exemplarisch für derartige Einflüsse sollen zwei Forschungsaktivitäten aus der letzten Zeit kurz beschrieben werden. Das Projekt „DESERTEC“ und die Technologie Carbon Capture and Storage (CCS), die für die Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid, besonders bei Kohlekraftwerken dienen soll. Technische und ökonomische Lösungen erfordern die stärkere Verknüpfung mit sozialen Komponenten, wie es sich u.a. in DESERTEC zeigt. In diesem Vorhaben soll das enorme Potential der Solarenergie für eine zukünftige Stromversorgung ausgeschöpft werden und im Jahre 2050 ca. 15 Prozent des europäischen Strombedarfes decken [1].

Zum Transport des Stroms aus Nordafrika nach Europa wird die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) gewählt. Diese bietet sich aufgrund der hohen zu überbrückenden Distanzen an. Es gibt grundsätzlich vier verschiedene Möglichkeiten, um Leitungen von Nordafrika nach Europa zu verlegen. Ein Weg führt von Marokko über die Straße von Gibraltar nach Spanien, ein zweiter Weg verläuft von Tunesien über Sizilien nach Italien. Eine dritte Möglichkeit ist der lange Seeweg von Libyen nach Griechenland und die letzte mögliche Verbindung stellt eine Landverbindung über den Nahen Osten und die Türkei dar. Eine einzelne HGÜ-Zweipunkt-Verbindung von Ägypten bis in das Lastzentrum Zentraleuropas würde eine Strecke von ca. 4000 km überbrücken und wird damit sicher nicht eine der ersten Strecken sein, die gebaut wird. Auch

die Verbindung über Griechenland ist als erster Leitungsweg unwahrscheinlich, da eine Seeverbindung von ca. 500 km Länge überbrückt werden müsste und Knoten mit hohem Einspeisungspotential erst nach ca. 2000 km erreicht werden. Realistisch sind HGÜ-Verbindungen mit mehreren Einspeisepunkten auf dem Weg von Nordafrika in die Lastzentren Zentraleuropas, hauptsächlich Deutschland und Frankreich. So kann die elektrische Energie auf ihrem Weg in die Mitte Europas von verschiedenen Punkten aus verteilt werden. Ein Land würde den Bau einer Hochleistungsfernübertragungsstrecke mit entsprechendem Platzbedarf sicher nicht genehmigen, ohne selbst daran angeschlossen zu werden. Als Anschlusspunkte bieten sich Lastzentren an, vornehmlich also Knoten in der Nähe großer Städte, die eine entsprechende Aufnahmefähigkeit haben. Neben jenen technischen und ökonomischen Überlegungen haben auch soziale und politische Aspekte Einfluss auf die Umsetzbarkeit des Projektvorhabens. Die betroffenen afrikanischen Staaten könnten aus den Einnahmen des exportierten Stroms sich weiterentwickeln und könnten somit neben der Eigenversorgung zusätzlich profitieren. Aber speziell die Gefahr einer europäischen Abhängigkeit von nordafrikanischen Solarstrom, vergleichbar mit einer, wie momentan von den ölproduzierenden Ländern, ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund erfordert eine ganzheitliche Bewertung des Projektes die Klärung zahlreicher offener Fragen u.a. hinsichtlich der Energiesicherheit, sozioökonomischer Entwicklung, und der internationalen Zusammenarbeit, um den langfristigen Erfolg von „DESERTEC“ zu sichern.

Eine weitere Technologie, die soziale Einflüsse aufweist, ist CCS, womit die Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid aus dem Kraftwerksprozess, speziell bei Kohlekraftwerken, beschrieben wird. Neben der technischen Umsetzbarkeit



dieser Technologie sind auch Betrachtungen zur gesellschaftlichen Akzeptanz und Durchsetzung notwendig. Denn vermehrt verhindern jene gesellschaftliche Proteste und Haltungen den Bau solcher Maßnahmen. Dies ist besonders im Zuge von Neuerungen ersichtlich. Daher ist es für die Diffusion neuer Technologien und Innovationen immer bedeutender so früh, wie möglich, verschiedenste Gruppen über diese aufzuklären, um so Informationslücken zu schließen und Akzeptanzproblemen vorzubeugen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, das Energieversorgungsunternehmen zukünftig in ihren Entscheidungen neben den bekannten ökonomischen und technischen Aspek-

ten auch soziale und gesellschaftliche Kriterien keinesfalls unberücksichtigt lassen dürfen.

Quellen

- [1] DLR, *Strom aus der Wüste*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2010

Kontakt

Dipl.-Wirt.-Ing. Baris Özalay
oezalay@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-93041

Witterungsabhängiger Freileitungsbetrieb zur Nutzung von Übertragungsreserven

Die Auslastung von Freileitungen nahm in den letzten Jahren stetig zu. Auf Grund des Ausbaus der Windkraft, der Errichtung neuer Kraftwerke in Küstennähe sowie des Stromhandels ist der Transportbedarf großer Energiemengen von Nord- nach Süddeutschland stark gewachsen. Im Rahmen der dena II Netzstudie [1] sind die bis 2020 notwendigen Netzverstärkungen und -ausbaumaßnahmen auch unter Berücksichtigung von Technologien zur Steigerung der Übertragungskapazität vorhandener Freileitungen ermittelt worden. Hier werden insbesondere der witterungsabhängige Freileitungsbetrieb sowie die Hochtemperaturleiter genannt. Bei der Verwendung dieser Technologien besteht gemäß dena II Netzstudie Untersuchungsbedarf insbesondere im Hinblick auf die Integration in Netzbetrieb und Netzplanung. Das IFHT unterstützt die Weiterentwicklung der Technologien im Rahmen von Feldversuchen, Laboruntersuchungen und Modellbildung. Heute wird der witterungsabhängige Freileitungsbetrieb von einigen deutschen Netzbetreibern genutzt bzw. vorbereitet [2, 3, 4].

Witterungsabhängiger Freileitungsbetrieb

Die Strombelastbarkeit von Freileitungen wird im Wesentlichen durch drei Faktoren begrenzt. Aus Gründen der Verkehrssicherungspflicht müssen die erforderlichen Abstände zum Boden oder zu Objekten gewahrt, die maximal zulässige Leitertemperatur sowie die aus stationären und dynamischen Netzberechnungen resultierenden maximal zulässigen Lastflüsse eingehalten werden. Beim Freileitungs-Monitoring wird die Strombelastbarkeit von Stromkreisen mit Freileitungen abhängig von den aktuellen Witterungsbedingungen bestimmt - insbesondere die Umgebungstemperatur und die Windgeschwindigkeit sind hier wesentliche Einflussgrößen. In der Regel können diese Größen an verschiedenen Stellen entlang der Freileitung erfasst und aus den Messwerten die für den Leiter relevanten Witterungsdaten ermittelt werden. Die verschiedenen Annahmen, die zur Berechnung der Strombelastbarkeit getroffen werden, müssen gewährleisten, dass die maximal zulässige Leitertemperatur nicht überschritten wird sowie die normativ festgeleg-

ten, zulässigen Abstände zum Boden oder zu Objekten gewahrt bleiben. Grundsätzliche Hinweise zum witterungsabhängigen Freileitungsbetrieb finden sich in [5].

Zur Bestimmung der Dauerstrombelastbarkeit eines Leiters, wird in Deutschland vielfach von den folgenden Witterungsbedingungen ausgegangen:

- Direkte Sonneneinstrahlung für Mitteleuropa: ca. 900 W/m²
- Umgebungstemperatur 35°C
- Windgeschwindigkeit senkrecht zum Leiter $v = 0,6$ m/s

Die Analyse von statistischen Wetterdaten zeigt, dass diese Extrembedingungen, besonders deren Gleichzeitigkeit selten erfüllt sind. Die Unterstellung eines zumindest temporär höheren Auslastungspotentials der Freileitungen unter Berücksichtigung der spezifischen Wetterbedingungen ist folglich begründet.

Laufende Arbeiten

Die laufenden Arbeiten in diesem Bereich verfolgen folgende wesentliche Ziele:
Gebräuchliche Berechnungsverfahren zur

Bestimmung der Strombelastbarkeit (Cigre [6], IEEE, Webs) sind hinsichtlich ihrer Unsicherheiten und der physikalischen Grundlage für kleine Windgeschwindigkeiten nur unzureichend abgesichert. Durch experimentelle Untersuchungen und Simulationen der physikalischen Vorgänge am Leiter können die Ergebnisse wechselseitig auf Plausibilität geprüft werden. Gleichzeitig trägt die experimentelle Herangehensweise dem komplexen physikalischen Charakter des Sachverhalts Rechnung. Im Institut stehen die experimentellen und simulatorischen Möglichkeiten zur Verfügung, den Einfluss kleiner Windgeschwindigkeiten unterhalb von 0,6 m/s auf die Leitertemperatur und damit auf die Strombelastbarkeit detailliert zu untersuchen.

Zur Bestimmung der Strombelastbarkeit einer Freileitung müssen die maßgeblichen Witterungsbedingungen bekannt sein. Messwerte stehen in der Regel aus einzelnen in leitungsnähe befindlichen Wetterstationen zur Verfügung und der Leitungsverlauf ist geprägt durch eine individuelle Topographie, z.B. Waldflächen, Hügel, Bebauung, etc. Am Institut werden Verfahren entwickelt, die es ermöglichen, die Strombelastbarkeit unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen zu bestimmen.

Bei Bedarf können die hier entwickelten und verwendeten Ansätze auch in anderen Regionen Deutschlands und Europas zur Abschätzung des mit witterungsabhängigem Freileitungsbetrieb zur Verfügung stehenden Potenzials verwendet werden.

Quellen

- [1] dena Netzstudie II, 2010
- [2] Schmale, M.; Puffer, R.: *Freileitungen sicher betreiben und Reserven nutzen*; Netzpraxis, Jg.49 (2010), Heft 11
- [3] Schmale, M.; Dräger, H.-J.; Puffer, R.; Kliegel, R.: *Freileitungs-Monitoring - Entwicklung und Einführung eines Systems zur witterungsabhängigen Erhöhung der Strombelastbarkeit von Freileitungen*; ETG Kongress 2009
- [4] Dräger, H.-J.; Hussels, D.; Puffer, R.: *Development and Implementation of a Monitoring-System to Increase the Capacity of Overhead Lines*, Paper B2-101, Cigré Session 2008
- [5] FNN VDE-Anwendungsregel Witterungsabhängiger Freileitungsbetrieb, 2010, VDE-Verlag GmbH
- [6] Cigré, Technical Brochure 207: *The thermal behaviour of overhead conductors*, August 2002

Kontakt

Dr.-Ing. Ralf Puffer
 puffer@ifht.rwth-aachen.de
 +49 241 80-94950

Lehre am IFHT



Umstellung auf Bachelor- und Masterstudiengänge in der Elektrotechnik

Seit dem Wintersemester 2007/2008 ist eine Neueinschreibung für den Studiengang Elektrotechnik, Informationstechnik und technische Informatik (ET/IT/TI) nur noch für den Abschluss Bachelor of Science (B.Sc.) möglich. Seit dem Wintersemester 2010/2011 ist dementsprechend auch der konsekutive Master of Science eingeführt worden. Im Rahmen dieser Umstellung wurden die Inhalte und Strukturen des Studienganges einer Überprüfung und Überarbeitung unterzogen. Durch diese Umstellung haben sich auch für die Lehre am IFHT einige Änderungen ergeben.

Neue Vorlesungen und Vorlesungsinhalte

Die Umstellung auf die neuen Studiengänge machte Fakultätsübergreifend eine Anpassung der Studieninhalte notwendig. Seit der Umstellung werden alle Veranstaltungen als Module aufgefasst und in einem Modulhandbuch geführt. Für die Erstellung des Modulhandbuches des Masterstudienganges ET/IT/TI für den Studienschwerpunkt Energietechnik war das IFHT federführend verantwortlich. Zusätzlich ist am IFHT das Angebot an Lehrveranstaltungen angepasst worden, wie im folgenden dargestellt wird.

Komponenten und Anlagen der Elektrizitätsversorgung

Die Vorlesung Komponenten und Anlagen der Elektrizitätsversorgung wird im fünften Semester des Bachelorstudienganges Elektrotechnik, Informationstechnik und technische Informatik angeboten. Sie ist eine Pflichtveranstaltung für alle Studenten im fünften Semester, die die Vertiefungsrichtung Energietechnik gewählt haben und wurde zum ersten Mal im Wintersemester 2009/2010 angeboten. Durchgeführt wird die Vorlesung von Prof. Hameyer vom Institut für elektrische Maschinen (IEM), sowie von Prof. Schnettler, die sich dementsprechend die Inhalte aufgeteilt haben. Während Prof. Hameyer mit Wind-, Wasser-, Wärmekraftwerken, sowie

Generatoren und Transformatoren vor allem die Kraftwerks- und Erzeugungsaspekte der Elektrizitätsversorgung abdeckt, konzentriert sich Prof. Schnettler vor allem auf die Komponenten der Übertragungsnetze, wie z.B. Freileitungen, Leistungsschalter, Überspannungsableiter, Messeinrichtungen, sowie Prüfkreise.

Für die Erstellung dieser Vorlesung (inkl. Folien und Skript) wurden aus Studiengebühren Mittel bereitgestellt. Mit fast 100 Teilnehmern ist die Vorlesung sehr gut besucht und zeigt die Beliebtheit des Studienschwerpunktes Energietechnik unter den Studierenden.

Hochspannungstechnik

Im Diplomstudiengang wurde die Vorlesung Hochspannungstechnik in zwei aufeinander aufbauenden Teilen, Hochspannungstechnik I und Hochspannungstechnik II, angeboten. Für den Master mit dem Schwerpunkt Energietechnik stellt sich die Situation anders dar. Da von den 4 Semestern im Masterstudiengang den Studierenden durch das Praxissemester und die Masterarbeit bedingt nur 2 Semester für den Besuch von Vorlesungen verbleiben, musste eine größere Wahlfreiheit und Flexibilität für den Besuch von Vorlesungen verwirklicht werden. Aus diesem Grund wurden die Inhalte und Titel der beiden Vorlesungen so angepasst, dass die Teile Hochspannungstechnik - Isoliersysteme sowie Hochspannungstechnik - Prüfsysteme und

Diagnose voneinander unabhängig gehört und geprüft werden können. Bislang wurden die Inhalte der letzteren Vorlesung vollständig angepasst und überarbeitet und ein kompletter Foliensatz erstellt.

Auch für diese Anpassungen wurden aus Studiengebühren Mittel bereit gestellt.

Neue Seminare und Projekte

Auch das Angebot an Seminaren und Projekten ist den Anforderungen der neuen Studiengänge angepasst worden.

Seminar Energieversorgung der Zukunft

Das frühere Seminar Gasentladungstechnik ist inhaltlich angepasst worden und firmiert nun unter dem Namen Energieversorgung der Zukunft. Es werden hier nun von den Studenten Themen bearbeitet, die eng mit zukünftigen Entwicklungen in der Energieversorgungstechnik zusammenhängen. Das Seminar ist für Bachelor- und Masterstudenten offen. Bachelorstudenten erhalten für die Teilnahme und einen 10 minütigen Vortrag insgesamt 3 Credit Points. Für Masterstudenten besteht die Möglichkeit durch die zusätzliche Abgabe einer drei bis fünfseitigen Ausarbeitung des zugewiesenen Themas 4 Credit Points zu erlangen.

Viertsemesterprojekt

Im Sommersemester 2010 wurde von allen energietechnischen Instituten der Fakultät (IFHT, ISEA, IAEW, IEM, ACS) ein gemeinschaftliches Projekt angeboten. In Dreiergruppen bauten die Studierenden im Team ein fahrtüchtiges, elektrisch betriebenes Modellauto. Dazu mussten sich die Studierenden mit Batterien, DC-Motoren für den Antrieb, Hoch- und Tiefsetzstetlern, Servo-Motoren für die Lenkung und der erforderlichen Mess- und Regeltechnik vertraut machen. Da das Fahrzeug selbständig einen Parkour durchfahren musste, lag ein besonderes Augenmerk auf der Steuerung und den notwendigen Sicherheitsvorkehrungen zum Schutz von Mensch und Material. Dem Wagen lag

ein Bausatz zu Grunde, sodass für alle Gruppen die gleiche Ausgangssituation geschaffen wurde. Das Design der Platinen für die Steuerung, das Löten der Platinen, der Zusammenbau der Fahrzeuge und die Programmierung der Steuerung wurde von den Studierenden selbstständig durchgeführt. Dabei bekamen sie in insgesamt 5 Einheiten die notwendigen Hintergrundinformationen zum Strecken- und Geschwindigkeitssensor, zum DC-DC-Wandler, zum Motor und zur Programmierung des Microcontrollers. Außerdem konnten sie bei offenen Fragen und Problemen stets ihren Betreuer kontaktieren, der ihnen mit Rat und Tat zur Seite stand.

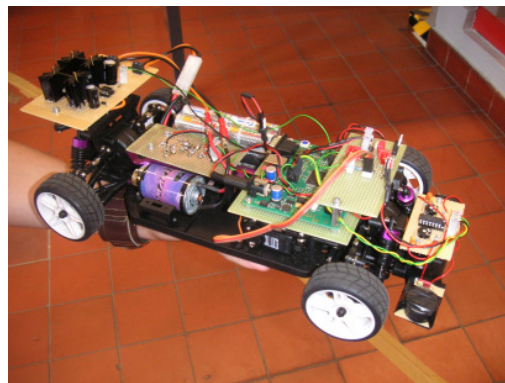


Abb. 1: Auto der Siegergruppe

Als Höhepunkt wurde am Ende des Projekts ein Zeitfahren durchgeführt, in dem die Autos der Studierenden gegeneinander und gegen das Auto der Betreuer antreten. Dabei musste der Wagen die Sicherheitskriterien erfüllen und den Parkour zweimal ohne Ausfall durchfahren. Abbildung 1 zeigt das Auto der Gruppe, die das Rennen für sich entscheiden konnte. Das Projekt wurde insgesamt als sehr gelungen bewertet und soll in Zukunft jedes Sommersemester durchgeführt werden.

Kontakt

Dipl.-Gwl. Maximilian Keller
 keller@ifht.rwth-aachen.de
 +49 241 80-94924

Lehre am IFHT

Hochspannungstechnik - Isoliersysteme (SS)

Dozent: Prof. Dr.-Ing. A. Schnettler
V2/Ü1: ab 5. Sem. Bachelorstudiengang
Sprache: Deutsch

Inhalt

- Elektrische Belastungen in Hochspannungsnetzen: Überspannungen, Wanderwellen, Überspannungsschutz
- Isoliersysteme: Gase, Vakuum, Flüssigkeiten, Feststoffe, Durchschlagvorgänge, Alterung, Fremdschichten
- Konstruktionsgrundlagen von Isoliersystemen
- Exemplarische Anwendungen: Kondensator, Durchführung, Ausleitung

Hochspannungstechnik - Prüf- systeme und Diagnostik (WS)

Dozent: Prof. Dr.-Ing. A. Schnettler
V2/Ü1: ab 1. Sem. Masterstudiengang
Sprache: Deutsch, Englisch

Inhalt

- Messung und Erzeugung hoher Gleich-, Wechsel- und Stoßspannung
- Messung und Erzeugung von Prüfströmen
- Synthetischer Prüfkreis
- Diagnostik: Elektr. und chem. Diagnoseverfahren, Teilentladungs-/ Ultraschalldiagnostik, Elektromagnetische Verträglichkeit, Prüftechnik
- Technische Exkursion

Komponenten und Anlagen der Elektrizitätsversorgung (WS)

Dozent: Prof. Dr.-Ing. A. Schnettler, Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. K. Hameyer
V2/Ü1: ab 5. Sem. Bachelorstudiengang
Sprache: Deutsch

Inhalt

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

- Einführung in die elektrische Energietechnik
- Elektrisches Feld: Grundlagen der Feldtheorie; Feldberechnung ausgewählter Anordnungen; Abschätzung der Maximalfeldstärke mit Hilfe des Schwaiger-Faktors
- Durchschlag in Gasen: raumladungsfreie und raumladungsbeschwerte Entladung; Durchschlagsmechanismen im homogenen und inhomogenen Feld
- Vorstellung der wichtigsten Komponenten der Elektrizitätsversorgung: Kabel und Leitungen; Leistungsschalter (SF₆; Vakuum), Trennschalter, Messwandler, Überspannungsableiter
- Erzeugung von Prüfspannungen: Prüftransformatoren und Transformator-kaskaden zur Erzeugung von Prüfwechselspannung; ein und mehrstufige Schaltungen nach Marx zur Erzeugung von Stoßspannungen (Marx-Generator)

Schutzmaßnahmen und Schutzeinrichtungen in elektrischen Netzen und Anlagen (SS)

Dozent: Dr.-Ing. B. Thies
V2/Ü1: ab 5. Sem. Masterstudiengang
Sprache: Deutsch, Englisch

Inhalt

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

Power Cable Engineering (WS)

Dozent: Dr.-Ing. D. Meurer
V2/Ü1: Masterprogramm in Electrical
Power Engineering
Sprache: Englisch

Inhalt

- Einführung in Kabelindustrie, Kabelmarkt, Kabel im Netz, Historie, Technische Standards, Übertragungseigenschaften
- Kabelkomponenten: Materialien, Leiter, Isolation, Schirm, Mantel, Armierung
- Design: Nieder-/ Mittel-/ Hochspannungskabel, Allzweck-/ Spezialkabel
- Produktion: Papierisolierte/Extrudierte Kable, Leiter/Kern/Kabel
- Qualitätsmanagement: ISO 9000, Qualitätssicherung, Typ-/ Stück-/ Routinetest, Inbetriebnahmetest, Alterung, Lebensdauer
- Zubehör: Endabschlüsse, Muffen, Feldsteuerung, Installationstechniken
- Kabelprojekte: Kabeltrasse, Stromtragfähigkeit, Transport, Verlegung
- Hochleistungskabel: Kabelverluste, Kühlung, HGÜ, Gasisolierte Kabel, Niedertemperaturkabel, Supraleitende Kabel (NTSL, HTSL)

Hoch- und Mittelspannungsschaltgeräte und -anlagen (WS/SS)

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

Dozent (WS): Prof. Dr.-Ing. A. Schnettler, Dr.-Ing. R. Puffer

V2/Ü1: ab 5. Sem. Bachelorstudiengang

Sprache: Deutsch

Inhalt

- Schaltlichtbögen
- SF₆-Hochspannungsleistungsschalter
- Vakuumschalter
- Hochspannungssicherungen
- Anlagen der Hochspannungsgleichstromübertragung
- Einführung in die Anlagentechnik und gasisolierte Schaltanlagen
- Freiluftschaltanlagen
- Ortsnetzstationen
- Leistungstransformatoren
- Mittelspannungsschaltanlagen
- Kabel und Freileitungen
- Störungsgeschehen von Betriebsmitteln der Elektrizitätsversorgung

Siehe Bericht auf Seite 111

Freileitungen (WS)

Dozent: Dr.-Ing. R. Puffer

V2/Ü1: ab 5. Semester

Sprache: Deutsch

Inhalt

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

Unternehmensführung für Ingenieure (SS)

Dozent: Dr.-Ing. J. Schneider

V2/Ü1

Sprache: Deutsch

Inhalt

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

Praktika und Seminare am IFHT

Energietechnisches Praktikum I (SS)

TÜ4, ab 6. Semester
Sprache: Deutsch, Englisch

Inhalt

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

- Wechselspannungsmessung und Durchschlagsuntersuchungen
- Gleichspannungserzeugung und -messung
- Stoßspannungserzeugung

Energietechnisches Praktikum II (WS)

TÜ4, ab 7. Semester
Sprache: Deutsch, Englisch

Inhalt

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

- Messen mit Teilern
- Stoßspannungsverteilung an Transformatorwicklungen
- Elektromagnetische Verträglichkeit

Hochspannungstechnisches Praktikum

TÜ4, ab 7. Semester für Elektrotechniker
Sprache: Deutsch

Inhalt

- Wechselspannungsuntersuchungen
- Gleichspannungsuntersuchungen
- Teilentladung
- EMV Störungseinkopplung
- Stoßspannungsuntersuchung
- Transiente Vorgänge auf Leitungen
- Hochspannungsmesstechnik
- Flüssige und feste Dielektrika

Elektrotechnisches Praktikum I (SS)

TÜ3, ab 2. Semester Elektrotechniker und Lehramtskandidaten
Sprache: Deutsch

Inhalt

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

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

Seminar Schutz- und Leittechnik (WS)

TÜ3, Master-, Diplomstudiengang
Sprache: Deutsch

Inhalt

- Grundlegende und spezielle Konzepte der Schutztechnik sowie Schnittstellen zur Leittechnik
- Aufzeigen von klassischen und modernen Ansätzen
- Herausforderungen der Schutz- und Leittechnik durch die Integration dezentraler Erzeuger und Speicher

Die Blockveranstaltung findet auf Einladung der Firma OMICRON statt. Die Vermittlung erfolgt durch Vorträge, Demonstrationen an Geräten, eine Besichtigung der Technik im Einsatz in einer Schaltanlage sowie vertiefenden Übungsaufgaben.

Seminar Energieversorgung der Zukunft (WS/SS)

TÜ3, Bachelor-, Master-, Diplomstudiengang
Sprache: Deutsch

Inhalt

- Erlernen von Techniken zur Darstellung und Präsentation eines komplexen Sachverhalts

Jeder Teilnehmer erhält ein aktuelles Thema aus einem definierten Bereich der elektrischen Energietechnik. Das Thema wird durch eigene Recherchen vorbereitet und am Ende des Semesters in einem Vortrag vorgestellt. Eine anschließende Diskussion zu Inhalt, Didaktik und präsentierten Folien rundet den Vortrag ab.

Seminar zum Praxissemester (WS/SS)

TÜ3, Bachelor-, Master-, Diplomstudiengang
Sprache: Deutsch

Inhalt

Die Veranstaltung richtet sich an alle Studierenden der Elektrotechnik und Informationstechnik mit abgeschlossenem Praxissemester. Jeder Seminarteilnehmer bereitet einen Vortrag über die Inhalte seines Praxissemesters vor. Eine anschließende Diskussion zu Inhalt, Didaktik und präsentierten Folien rundet den Vortrag ab.

Messtechnisches Labor für Maschinenbauer (SS)

TÜ4, ab 4. Semester für Maschinenbauer und Lehramtskandidaten
Gemeinschaftsveranstaltung der Fakultäten für Elektrotechnik, Maschinenwesen und der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
Sprache: Deutsch

Inhalt

Im Rahmen dieses Praktikums werden vom Institut vier Versuche angeboten:

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

In 2010 abgeschlossene Diplom-, Master-, Bachelor-, Studien- und Projektarbeiten

Diplomarbeiten

Altwasser, Dominik

Entwicklung optimaler Managementstrategien für Elektrofahrzeuge

Die anhaltende Debatte um den beschleunigten Klimawandel, sowie steigende Volatilitäten an den Rohstoffmärkten, haben eine gesellschaftliche und politische Diskussion über die zukünftige Mobilitätsstrategie in Deutschland angestoßen. Öffentlichkeitswirksames Kernelement dieser Debatte ist das Thema der Elektromobilität. Hierbei stellt die Integration der Elektrofahrzeuge in die bestehenden Übertragungs- und Verteilnetze einen Schwerpunkt der aktuellen Forschung im Themengebiet der Elektromobilität dar. Dieses Interesse liegt zum Teil an der Fähigkeit der Elektrofahrzeuge, elektrische Energie in den verbauten Akkumulatoren zwischenspeichern zu können, bevor diese zu einem späteren Zeitpunkt z.B. für die Erzeugung mechanischer Antriebsenergie genutzt wird, was eine flexible Steuerung der Be- und Entladevorgänge ermöglicht. Um die Möglichkeiten zum flexiblen Be- und Entladen von Elektrofahrzeugen ausnutzen zu können, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Steuerungsverfahren auf Basis Evolutionärer Algorithmen entwickelt, mit dem sowohl die zeitliche als auch die räumliche Anordnung der Ladevorgänge anhand verschiedener Kriterien in einem realen Netzmodell gezielt beeinflusst werden kann. Anwendungsmöglichkeiten für dieses Verfahren umfassen die Vermeidung von Überlastungen der vorhandenen Netzinfrastruktur sowie eine möglichst kostengünstige Beladung der betrachteten Elektrofahrzeuge. Die Funktio-

nalität des entwickelten Verfahrens wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit anhand eines entwickelten Anwendungsszenarios verifiziert, der Algorithmus ordnet die Ladevorgänge entsprechend der vorgegebenen Zielfunktion erwartungsgemäß an. Beobachtete Anomalien, insbesondere im Hinblick auf die räumliche Komponente des Optimierungsverfahrens, lassen sich auf die betrachtete Fahrzeugpopulation zurückführen. In weitergehenden Untersuchungen konnte zudem das Potenzial Evolutionärer Algorithmen für weitergehende Betrachtungen, wie multikriterielle Optimierung und die Verwendung probabilistischer Eingangs- und Zielgrößen gezeigt werden.

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

Beilin, Michael

Untersuchung des Einflusses von Nanopartikeln auf die Eigenschaften von syntaktischem Schaum

Syntaktischer Schaum ist ein Verbundstoff aus Glas-Mikrohohlkugeln und Epoxidharz, welcher als leichter Isolierstoff in der Hochspannungstechnik verwendet wird. Durch Einbringen von Mikrohohlkugeln in das Epoxidharz wird die Viskosität des Gesamtmaterials erhöht. Herstellungsbedingt kann daher nur ein maximaler Füllgrad an Mikrohohlkugeln von ca. 55 Vol.-% erzielt werden. Eine Verbesserung der Herstellung wird durch die Zugabe von Nanopartikeln erreicht, da diese nachweislich eine Verringerung der Viskosität bei der Verarbeitung des Materials bewirken. Der Fokus dieser Diplomarbeit liegt dabei auf der experimentellen und theoretischen Untersuchung der thermischen, elektrischen und mecha-

nischen Eigenschaften des mit Nanopartikeln versetzten syntaktischen Schaums. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse werden verschiedene Modelle zum Einfluss der Nanopartikel aufgestellt. Als wesentliches Ergebnis der Arbeit kann festgehalten werden, dass Nanopartikel die thermischen und elektrischen Eigenschaften und die Verarbeitung des syntaktischen Schaums verbessern, wohingegen die mechanischen Eigenschaften geringfügig verschlechtert werden.

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

Doroudian, Sepideh

Szenarioanalyse zur Bestimmung des Einflusses fluktuierender Einspeisung auf die deutschen Stromnetze

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Einfluss der Integration von dezentralen Wandlungstechnologien und der daraus folgenden Last- und Einspeisefluktuationen auf Niederspannungsnetze. Aufgrund politischer Zielsetzungen und durch das zunehmende ökologische Bewusstsein der Gesellschaft wird in den kommenden Jahren mit einem verstärkten Einsatz von dezentralen Wandlungstechnologien gerechnet. Zur Untersuchung des Einflusses dieser Technologien auf die Niederspannungsnetze wird in dieser Arbeit zunächst ein Modell entwickelt, das das stochastische Verhalten einzelner dezentraler Wandlungstechnologien simuliert. Mit Hilfe dieses Simulationsmodells werden die Potentiale für einzelne Technologien ermittelt. Dies geschieht sowohl für aktuellen Zeitpunkt als auch - im Rahmen einer Szenarioanalyse - unter Berücksichtigung möglicher Entwicklungen bis zum Jahr 2040. Im Anschluss daran wurden für ausgewählte Szenarien die spezifischen Kosten und Emissionen sowie die sich ergebende Stromautarkie berechnet. Aus den gewonnen Ergebnissen lassen sich Rückschlüsse auf den

optimalen Netzbetrieb und auf die erforderliche Fortentwicklung des Kraftwerksparks ziehen.

Betreuer: Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Thomas Dederichs, Dipl.-Wirt.-Ing. Eva Szczechowicz

Dulisch, Fabian

Konzeption, Erweiterung und Inbetriebnahme eines Prüfkreises zur Untersuchung von Kontaktwerkstoffen in Vakuumschaltkammern

Für Nieder- und Mittelspannungsanwendungen bis zu 40,5kV hat sich das Vakuumschaltprinzip über die letzten 30 Jahre hinweg gegenüber anderen Schaltprinzipien, wie zum Beispiel dem ölarmen- oder dem mit SF6 gefüllten Leistungsschalter, mit stetig steigendem Anteil im Markt etabliert. Unter Verwendung moderner Kontaktwerkstoffe und Kontaktgeometrien sind Vakuumschaltkammern für fast alle Ein- und Ausschaltaufgaben geeignet. Die Lebensdauer der Schaltkammern wird maßgeblich durch den eingesetzten Kontaktwerkstoff bestimmt. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit ein Prüfkreis konzipiert, erweitert und in Betrieb genommen, der den Betrieb bei hohen Schaltzahlen möglichst exakt nachbildet. Des Weiteren werden verschiedene Kontaktwerkstoffe untersucht.

Betreuer: Dipl.-Ing. Andreas Kurz, Dr. D. Gentsch

Filippidis, Stylianos

Zustandserfassung und -prognose an Betriebsmitteln in luftisolierten Schaltanlagen

Einen direkten Einfluss auf Kosten und Versorgungsqualität hat die Instandhaltung der Betriebsmittel in den elektrischen Netzen. Eine Zustandserfassung sowie eine Zustandsprognose ermöglichen Netzbetreibern den Weg in Richtung einer zustandsorientierten Instandhaltung zu beschreiten, welche im Allgemeinen als kostenoptimal

angesehen wird. Im Rahmen der Diplomarbeit wurde eine Methode zur Zustandserfassung und- prognose entwickelt, welche das Wissen von Experten im Hause der Netzbetreiber berücksichtigt.

Betreuer: Dipl.-Ing. Christian Hille

Fuchs, Bernhard

Experimentelle Analyse der Stromtragfähigkeit elektrischer Freileitungen

In Deutschland haben Gründe wie die Liberalisierung des Strommarktes, die Osterweiterung des UCTE-Netzes sowie der Ausbau der Windenergie zu neuen Anforderungen an die Übertragungsnetze geführt. Neue Lastflussmuster erfordern die Durchführung von Modernisierungsmaßnahmen, was auf lange Sicht einen Ausbau der Netze bedeutet. Für die Praxis ist diese Maßnahme mit langen Genehmigungsverfahren (>10 Jahre) verbunden, die gegenwärtig durch kurz bis mittelfristige Lösungen überbrückt werden müssen. In diesem Zusammenhang ist das Freileitungsmonitoring eine vielversprechende Möglichkeit. Die Idee basiert auf der Ausnutzung günstiger Wetterbedingungen, die zu einer Erhöhung bestehender Übertragungskapazitäten führen. Hierfür kommen mathematische Modelle zum Einsatz, die das thermische Verhalten der Leitung in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen beschreiben. Am Beispiel des CIGRE Modells soll die Gültigkeit dieser Aussagen mit Hilfe experimenteller Untersuchungen im Labor überprüft werden. Der Schwerpunkt dieser Arbeit besteht in der Konzeption sowie der Umsetzung eines Laboraufbaus zur Untersuchung des Einflusses niedriger Windgeschwindigkeiten (< 1m/s) auf die Leitertemperatur. Das Konzept wird anhand der bestehenden Anforderungen sowie geeigneter Modellanalysen abgeleitet und in der Umsetzung beschrieben. Durch die Vermessung von Aktorik und Sensorik werden die charakteristischen Eigenschaften des Systems festgelegt, be-

vor abschließend die Durchführung und Diskussion von Labormessungen hinsichtlich der Verifikation des CIGRE-Modells erfolgen.

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

Gialinizoglou, Vasileios

Entwurf und Aufbau eines Kommunikationssystems zur Anbindung dezentraler Messsysteme und steuerbarer Lasten an eine Leitstelle

Das Phänomen "Klimawandel" ist eine der größten Herausforderungen unserer Zeit. Inzwischen verlangt der Klimaschutz die drastische Reduktion von Emissionen und somit eine Umstellung des Energiesystems auf ein effizienteres, mit mehr Quellen erneuerbarer Energie. Die Politik hat in den letzten Jahren eingesehen, dass sie im Interesse der gesamten Menschheit handeln muss und den Klimaschutz als die treibende Kraft für mehr Wachstum und Arbeitsplätze erkannt. Der Beitrag der vorliegenden Diplomarbeit ist es, die Eindämmung des Klimawandels zu unterstützen, indem eine bessere Netzintegration von erneuerbaren Energien in die vorhandenen Infrastrukturen ermöglicht wird. In dieser Arbeit werden ein Mess-, ein Kommunikations- und ein Datenspeichersystem entworfen, aufgebaut und implementiert, welche als das Rückgrat eines Monitoringsystems zur Überwachung des Netzzustandes dienen sollen. DIN EN 50160 bildet die Grundlage für die Identifikation geeigneter Kenngrößen zur Beschreibung des Netzzustandes. Weiter wurde - basierend auf Messverfahren nach DIN EN 61000-4-30 - die Implementierung der Messwerteerfassung durchgeführt. Schließlich werden die fortan erfassten und berechneten Werte in einer Datenbank geeigneter Struktur gespeichert, wo sie für weitere wissenschaftliche Forschungen zur Verfügung stehen. Erste Mes-

sungen haben gezeigt, dass das aufgebaute Messsystem funktioniert und die erfassten Messwerte über das virtuelle private Netzwerk (Kommunikationssystem) erfolgreich an das Datenspeichersystem übergeben und gespeichert wurden. Die Performanzanalyse hat bezüglich des Netzwerkdurchsatzes gute Ergebnisse gezeigt (erforderliche Bandbreite des Kommunikationssystems durchschnittlich ca. 6 kbit/sec), während die Prozessoren Auslastung alarmierend und verbesserungswürdig ist.

Betreuer: Dipl.-Ing. Claas Matrose, Dipl.-Ing. Holger Krings

Gödde, Markus

Technische Analyse des Einflusses verteilter Energiewandlungseinheiten auf Verteilungsnetze mithilfe eines agentenbasierten Investitionsmodells

Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit technischen, ökonomischen und ökologischen Konsequenzen einer vermehrten Integration verteilter Energiewandlungseinheiten in Verteilungsnetze. Kern der Arbeit ist ein agentenbasiertes Investitionsentscheidungsmodell, das unter Berücksichtigung sozioökonomischer Faktoren den Entscheidungsprozess von Haushalten für Energiewandlungseinheiten am Beispiel von Photovoltaik-, Mikro-Kraft-Wärme-Kopplungs- und Kleinwindenergieanlagen nachbildet und unter Berücksichtigung von Wetter- und Geodaten Durchdringungsraten für verschiedene Gebietstypen bis 2030 liefert. Zusätzlich werden Elektrofahrzeuge als exogener Faktor berücksichtigt. Darauf aufbauend werden Lastflussberechnungen für verschiedene Verteilungsnetze durchgeführt und die Wirksamkeit von Steuerungsmechanismen durch intelligente Ortsnetzstationen, Ladestrategien von Elektrofahrzeugen sowie Eingriffe in die Subventionierung der Energiewandlungseinheiten untersucht. Desweiteren wird ein Verfahren entwickelt, mit dem die Kombi-

nation von Agentenpopulationen und Verteilungsnetzen für verschiedene Subventionsstrategien und Bilanzräume im Sinne von spezifischen CO₂-Emissionen (ökologisch), Subventions- und Netzausbaukosten (ökonomisch) sowie Spannungsbandverletzungen und Autarkie (technisch) im Zeitverlauf bis 2030 bewertet werden können. Ein Ergebnis dieser Arbeit ist die starke Belastung von Verteilungsnetzen in ländlichen und sonnenreichen Gebieten im Süden Deutschlands durch die zunehmende Anzahl von Photovoltaik-Anlagen, die zu lokal hohen Netzausbaukosten und vergleichsweise geringen Autarkiegraden führen. Im Modell führt eine höhere Subventionierung von Kraft-Wärme-Kopplung und Kleinwindenergieanlagen im Rahmen der technischen Ökoeffizienzbewertung zu besseren Ergebnissen. Weiterhin wird festgestellt, dass intelligente Ortsnetzstationen signifikant zur Netzstabilität beitragen, allerdings notwendige Netzausbaukosten nur minimal verzögern können. Bei einer moderaten Durchdringung von Elektrofahrzeugen mit geringer Ladeanschlussleistung kann die Netzstabilität nicht signifikant erhöht werden. Insgesamt wird festgestellt, dass die vermehrte Durchdringung mit verteilten Energiewandlungseinheiten besonders im Sommer zu Mittagszeiten in südlichen, bevölkerungsreichen Gebieten zu hohen Einspeisungen elektrischer Energie in das Übertragungsnetz führt, die die dortige Kraftwerkseinsatzplanung in Zukunft maßgeblich beeinflussen werden.

Betreuer: Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Thomas Dederichs, Dipl.-Wirt.-Ing. Eva Szczepowicz

Gütke, Alexander Thomas

Ökologisch-technische Analyse von Betriebsstrategien für Elektrofahrzeuge zur Integration von erneuerbaren Energien ins Übertragungsnetz

Durch freiwillige Selbstverpflichtung wie

dem Kyoto-Protokoll steigt der Druck, Emissionen zu vermeiden, immer mehr. Die Ziele der Politik sind hoch und nur mit großen Anstrengungen zu realisieren. Einen wesentlichen Beitrag zum Erreichen dieser Ziele wird sich dabei von der Integration neuer Konzepte wie der Elektromobilität und den erneuerbaren Energien versprochen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden deswegen die ökologischen Potentiale von Elektrofahrzeugen wie auch von Plug-In-Hybriden untersucht. Dabei stehen sowohl die unmittelbar mit dem Betrieb der Fahrzeuge verknüpften Emissionen als auch die Möglichkeit zur Unterstützung der Integration erneuerbarer Energien im Fokus. Hierfür werden geeignete Betriebsstrategien für die Fahrzeuge entwickelt und mithilfe eines Simulationsmodells umgesetzt. Eine Unterscheidung in sechs Fahrzeugkategorien ermöglicht eine exakte und differenzierte Bestimmung von Emissionswerten, die über die gewöhnliche Durchschnittsbildung hinaus einen Vergleich mit konventionellen Fahrzeugen ermöglicht. Als Bemessungsgröße wird dabei das CO₂ Äquivalent herangezogen. Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass Elektrofahrzeuge klare ökologische Vorteile gegenüber ihren Pendanten mit Verbrennungsmotor vorweisen. Jedoch zeigt sich auch, dass bei der Integration zentral gebündelter erneuerbarer Energien wie Offshore-Windparks sind die Grenzen einer möglichen Unterstützung durch Elektrofahrzeuge schnell erreicht sind.

Betreuer: Dipl.-Wirt.-Ing. Eva Szczechowicz, Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Thomas Dederichs

Hinrichs, Hauke

Szenarienbasierte Bewertung der Entwicklung von Elektromobilität unter Berücksichtigung netztechnischer und wirtschaftlicher Aspekte

Der Fokus der vorliegenden Diplomarbeit

liegt auf den Implikationen von Ladeinfrastruktur für Elektromobilität. Diese Infrastruktur stellt einen wichtigen Bestandteil bei der Diffusion der Technologie dar - ohne die Ausbringung von Ladepunkten wird kaum Bereitschaft auf Seiten der Nutzer vorhanden sein wird, ein Elektrofahrzeug zu fahren. Allerdings sind die betriebswirtschaftlichen, volkswirtschaftlichen und ökologischen Charakteristika der Ladeinfrastruktur kaum bekannt. Die Anforderungen an Ladeinfrastruktur werden letztendlich durch die zukünftige Fahrzeugpopulation bestimmt - auch diese ist nur in unzureichender Form bekannt. In dieser Arbeit wird ein Modell vorgestellt, welches ausgehend von real mit einem Personenkraftwagen zurückgelegten Wegen in einem Multi-Agenten-System Fahrzeugpopulationen extrapoliert und auf Basis der sich ergebenden Fahrzeugpopulationen betriebswirtschaftliche, volkswirtschaftliche sowie ökologische Aspekte der Ladeinfrastruktur betrachtet. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse werden politische Handlungsempfehlungen hinsichtlich Subventionsstrategien für Ladeinfrastruktur abgeleitet.

Betreuer: Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Thomas Dederichs, Dipl.-Ing. Claas Matrose, Dipl.-Kfm. Andreas Pfeiffer

Kalverkamp, Frederik

Bewertung der elektrischen Eigenschaften von Windparks auf Basis von Modellrechnungen mit Blick auf die Vorgaben der Systemdienstleistungsverordnung

Die vorliegende Arbeit behandelt die Bewertung der elektrischen Eigenschaften von Erzeugungsanlagen, deren Nachweis seit 2009 am Netzanschlusspunkt durch die Systemdienstleistungsverordnung (SDL-WindV) gefordert wird. Die Bearbeitung erfolgt an-hand eines realen Windparks. Zunächst werden die zugrunde liegenden Netzanschlussregeln sowie mit geltende

technische Richtlinien der Forschungsgesellschaft Windenergie und andere Erneuerbare Energien (FGW) vorgestellt. Darüber hinaus werden die anzuwendenden Methoden und Rechenverfahren zur Validierung von Einheitenmodellen erläutert, die die Grundlage für den Ausweis des Fehlerfallverhaltens auf Windparkebene darstellen. Weiterhin wird die Methodik zur Bewertung der elektrischen Eigenschaften von Erzeugungsanlagen auf Basis dieser Modelle und weiterer Charakteristika der Erzeugungseinheiten und Betriebsmittel des Parks identifiziert und beschrieben. Die Überprüfung der Validierungskriterien anhand eines Herstellermodells einer realen Erzeugungseinheit mündet in ein validiertes Einheitenmodell zur Abbildung des Fehlerverhaltens der Erzeugungsanlage auf Basis dynamischer Stabilitätsberechnungen. Dieser Ausweis und zusätzliche Berechnungen der elektrischen Eigenschaften des Windparks über komplexe Lastflussberechnungen und bewährte Rechenverfahren sowie die Prüfung von Einheitenzertifikaten und Komponentencharakteristika bilden die Grundlage für die Bewertung hinsichtlich seiner Normenkonformität. Ergänzend werden weitere technische Analysen unterschiedlicher Netzzustände und -topologien und daraus folgende Bewertungen hinsichtlich der Systemstabilität durchgeführt. Diesen technischen Studien folgt eine monetäre Bewertung der nachgewiesenen Systemleistungen sowie eine Aufwand-Nutzen-Bewertung der Prozessschritte "Validierung- und Anlagensimulation. Die Arbeit endet mit einem Ausblick auf weitere offene Punkte in den aktuell festgelegten Nachweisverfahren.

Betreuer: Dipl.-Ing. Martin Brennecke, Dipl.-Phys. Bernhard Schowe-von der Brellie, Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Thomas Dederichs

Kippen, Michael

Monetäre Netzbewertung auf Grundlage von frei verfügbaren Informationen

Die weltweit zunehmende Liberalisierung des Energiemarktes bietet für Betreiber von elektrischen Netzen auch die Möglichkeit von Netzan- und -verkäufen. Für Käufer ist eine vorangehende monetäre Bewertung der Netze eine zwingende Voraussetzung zur Beurteilung des Kaufbetrages. Im Rahmen der Diplomarbeit sollte, ausgehend von Informationen die frei verfügbar sind, eine Methode zur Abschätzung des Wertes von Hoch- und Höchstspannungsnetzen erfolgen. Hierbei stand die Bestimmung der Anzahl installierter, kostenintensiver Betriebsmittel an erster Stelle. Hierzu wurde ein innovatives Verfahren entwickelt, welches auch in diesem Jahresbericht mit dem Thema "Synthetische Generierung von Netztopologien unter Nutzung öffentlich zugänglicher Daten" gefunden werden kann.

Betreuer: Dipl.-Ing. Christian Hille

Klosta, Florian

Modellierung und Analyse von virtuellen Energieversorgungssystemen mit verteilten Wandlungseinheiten

Die vorliegende Arbeit thematisiert die Versorgung eines Untersuchungsgebiets mit Strom und Wärme. Durch den Ansatz eines Virtuellen Energieversorgungssystems als Zusammenschluss von dezentraler Energiewandlung, Verbrauch, Speicherung und Netz mit zentraler Steuerung soll eine ökonomische, ökologische und sichere Versorgung mit Strom und Wärme im privaten Bereich sichergestellt werden. Eine Analyse des Wärmebedarfs und der Anlagen zur Deckung des Strom- und Heizbedarfs ist die Grundlage für das in dieser Arbeit erarbeitete Modell eines Virtuellen Energieversorgungssystems. Das Modell ist in der Lage verschiedene Kraftwerks- und Heizungsparks zu simulieren, sie mit unterschiedlichen Strategien zu betreiben und

zu bewerten. Die Ergebnisse zeigen, dass durch den Zusammenschluss zu einem Virtuellen Energieversorgungssystem ökologische und ökonomische Vorteile bei der Versorgung mit Strom und Wärme gegenüber dem ungesteuerten Betrieb erreicht werden können.

Betreuer: Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Thomas Dederichs, Dipl.-Ing. Stefan Krenzel, Dipl.-Ing. Joachim Funcke (IDG)

Koch, Myriam

Untersuchungen zur Messung der ortsabhängigen Widerstandsverteilung von Lichtbögen

In Hochspannungs-Leistungsschaltern werden Lichtbögen innerhalb von Isolierstoffdüsen geführt und durch die Beblasung mit Gas gekühlt. Diese Beblasung sorgt kurz vor dem natürlichen Stromnulldurchgang für einen Anstieg des Lichtbogenwiderstands. Die Höhe des Widerstands ist entscheidend für eine erfolgreiche Schalthandlung des Leistungsschalters. Im Rahmen der Diplomarbeit soll eine Einrichtung zur Messung der örtlichen Verteilung des Lichtbogenwiderstands optimiert werden.

Betreuer: Dipl.-Ing. Matthias Hoffacker

Lütcke-Lengerich, Christoph

Analyse von Umwelteinflüssen auf die Stromtragfähigkeit elektrischer Freileitungen (Freileitungs-Monitoring) mittels charakteristischer Betriebs- und Geodaten

Durch die anwachsende Einspeisung regenerativer Energien in das deutsche Hoch- und Höchstspannungsnetz, speziell im Norden vorwiegend durch Windenergieeinspeisung geprägt, stoßen die bestehenden Freileitungen an ihre Übertragungsgrenzen. Mithilfe des sogenannten Freileitungs-Monitorings besteht die Möglichkeit die Belastbarkeit der Freileitungen aufgrund witterungsbedingter Kühlungseffekte zu erhöhen. Zur Berechnung der höheren

Strombelastbarkeit wird von dem Cigré-Modell ausgegangen, nach dem der Einfluss der Windgeschwindigkeit den größten Kühlungseffekt aufweist. Deshalb wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Verfahren zur räumlichen Interpolation der Windgeschwindigkeit unter Berücksichtigung abschattender Effekte der Landschaft implementiert. Anhand dieses Verfahrens wurde die höhere Belastbarkeit einer exemplarischen Freileitung in Form von einer Potentialkarte dargestellt. Darauf folgt eine Engpassanalyse dieser Freileitung, unter dessen Zuhilfenahme ein Netzbetreiber entscheiden kann, an welchen Orten Wettermesstechnik installiert werden sollte. Die abschließende Bewertung anhand eines synthetischen Netzes zeigt, dass durch den Einsatz des Freileitungs-Monitorings die Möglichkeit zu einer stärkeren Belastung von Freileitungen auf der Grundlage des implementierten Verfahrens besteht.

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

Ma, Ming

Analyse und Modellierung der Ausgestaltung zukünftiger Marktplätze für energiebezogene Systemdienstleistungen

In der vorliegenden Arbeit soll die Regelenergiemarktausgestaltung für die Zukunft untersucht werden, um die zügige Integration erneuerbarer Energie zu unterstützen. Für die Modellierung dieser Marktentwürfe sollen die ökonomischen und technischen Einflüsse bewertet werden. Zur Erbringung von Systemdienstleistungen im Bereich Frequenzhaltung (z.B. Bereitstellung von Regelenergie/-leistung) führen vier Übertragungsnetzbetreiber eine Ausschreibung auf einer gemeinsamen Internet-Plattform durch, um ihren Bedarf an Regelleistung zu decken. Dieser Auktionsmechanismus bildet den aktuellen deutschen Regelenergiemarkt. Dieses Modell steht vor der Her-

ausforderung, sich zukünftigen Situationen anpassen zu müssen und die Systemsicherheit stetig zu gewährleisten. Für die ökonomische Untersuchung stehen die Kriterien der Kostenminimierung und Reduzierung der Belastung der Endkunden im Mittelpunkt. Das Ziel des hier entwickelten Marktmodells besteht darin, Szenarien der zukünftigen Marktausgestaltung zu erstellen, Beschaffungskosten und Rentabilität bei den Kraftwerksbetreibern unter Einhaltung technischer Randbedingungen zu untersuchen. Im Rahmen von Szenarioanalysen werden die Einflussfaktoren des Regelleistungsbedarfs und die Preisentwicklung auf dem Regelenergiemarkt analysiert. Der Regelleistungsbedarf für 2020 wird mithilfe des Regelleistungsbedarf-Modells für verschiedene Szenarien bestimmt und beide Betrachtungswerte der Wirtschaftlichkeit werden mithilfe des Marktmodells für die Szenarien der Marktausgestaltung ermittelt. Nach der Untersuchung der Ergebnisse werden im Besonderen zukünftige Handelsmöglichkeiten für den Regelenergiemarkt empfohlen.

Betreuer: Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Thomas Dederichs, Dipl.-Wirt.-Ing. Eva Szczechowicz

Meinerzhagen, Ann-Kathrin

Szenarioanalyse zur technischen Ökoeffizienzbewertung globaler Energieversorgung
In dieser Arbeit werden Wirkungsmechanismen globaler Energieversorgung sowie mögliche Kriterien zur Bewertung derselben untersucht. Hierfür wurde die Szenarioanalyse als geeigneter Ansatz ausgewählt. Als Grundlage der Analyse wird zunächst die aktuelle globale Versorgungssituation analysiert und verschiedene Methoden in Hinblick auf die Bewertung der Energieversorgung ausgearbeitet. Über eine Analyse bestehender Weltmodelle und Szenarien werden Einflussfaktoren der Energieversorgung identifiziert. Die ermittelten Einflüsse

werden zu Triebfedern der Energieversorgung zusammengefasst und die Verknüpfungen zwischen den Triebfedern erläutert. Auf den somit bekannten Wirkmechanismen baut eine eigene Modellierung auf. In einer Sensitivitätsanalyse werden Ergebnisse der Modellierung auf ihre Konsistenz untersucht. Abschließend werden Szenarien zur Entwicklung der globalen Energieversorgung erstellt und Bewertungskriterien definiert.

Betreuer: Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Thomas Dederichs, Prof. Dr. Dr. Rafaela Hillerbrand

Natemeyer, Hendrik

Szenarioanalyse zur ganzheitlichen Bewertung zukünftiger Ausbaumaßnahmen im europäischen Übertragungsnetz

Die intensive Förderung regenerativer Energiewandlung und die Forderung nach der Ausdehnung des europaweiten Stromhandels machen den Ausbau des europäischen Übertragungsnetzes notwendig. Um diesen Ausbau optimal zu gestalten, ist ein Werkzeug zur Bewertung vorher definierter Ausbaumaßnahmen notwendig. Dieses Werkzeug wird in der vorliegenden Arbeit entwickelt. Dafür werden ein Modell des Netzes und eine Kraftwerksdatenbank weiterentwickelt und zu einem Gesamtmodell der europäischen Stromversorgung zusammengefügt. Zur Berechnung dieses Modells wird die Methodik des OPF (Optimal Power Flow) eingesetzt. Zusätzlich wird dieser hinsichtlich einer ökologischen Betrachtung erweitert (Ecological OPF). Die Methodik des OPF wird ausführlich erläutert und in einem Vergleich mit einer Simulation der Kraftwerkseinsatzplanung validiert. Ausgehend von Planungsgrundsätzen im Übertragungsnetz werden ökonomische, ökologische und technische Kriterien entwickelt, die eine Bewertung von Ausbaumaßnahmen zulassen. Zur Abbildung verschiedener Belastungen des Netzes werden

Szenarien definiert, die unterschiedliche Situationen der Last sowie der Verfügbarkeiten regenerativer Energiequellen abbilden. Abschließend werden europaweit Ausbauprojekte im Übertragungsnetz aus externen Quellen identifiziert und anhand der ökonomischen, ökologischen und technischen Kriterien bewertet.

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

Neef, Florian

Entwicklung und Modellierung netzstabilisierender Maßnahmen für Elektrofahrzeuge im Verbundnetz

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein reduziertes Netzmodell entwickelt, welches die qualitative Untersuchung des Einflusses von umrichtergekoppelten Verbrauchern auf die Stabilität des europäischen Verbundnetzes ermöglicht. Als umrichtergekoppelte Verbraucher werden exemplarisch Elektrofahrzeuge mit Batteriespeicher und Netzanschluss betrachtet. Die Stabilitätsbetrachtungen beinhalten sowohl Aspekte der Kleinsignalstabilität, die mithilfe von Modalanalysen untersucht wird, als auch der transienten Stabilität, zu der Aussagen anhand von RMS-Simulationen getroffen werden. Eingeschränkt werden die Untersuchungen durch die Betrachtung der Frequenz als zu stabilisierende Größe bei Vernachlässigung der Spannungsstabilität. Anhand des entwickelten Modells werden die Auswirkungen unterschiedlicher Regelkonzepte auf den Leistungsbezug der Elektrofahrzeuge und ihre Wirkung auf die Dämpfung von kritischen Netzpendelungen vorgestellt und es wird gezeigt, dass bei ausreichender Anzahl geeignet geregelter Elektrofahrzeuge die Dämpfung von Netzpendelungen erheblich verbessert werden kann und Netzfrequenzänderungen nach Erzeugungsausfällen abgemildert werden können. Die favorisierte Regelstrategie bietet nach heutigem gesetzlichen Stand trotz

der technischen Realisierbarkeit noch keine Möglichkeit zur Teilnahme am Primärregelreservemarkt, so dass eine Neuregelung der Richtlinien empfohlen wird, um die Netzstabilität auch in Zukunft bei weiterer Reduktion der rotierenden Massen im Netz zu gewährleisten.

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

Nikolic, Gregor

Untersuchung und Modellierung der dielektrischen Festigkeit von Heißgasen in Isolierstoffdüsen

In heutigen Selbstblasleistungsschaltern wird als Lösch- und Isoliergas überwiegend Schwefelhexafluorid (SF_6) eingesetzt. Der Einsatz liegt vor allem in dessen guter Wärmeleitfähigkeit und der hohen Elektronegativität begründet. Durch diese Eigenschaften weist SF_6 ein herausragendes thermisches und dielektrisches Ausschaltverhalten auf. Allerdings ist SF_6 ein starkes Treibhausgas, weshalb gesellschaftliche und politische Klimadebatten die Suche nach einem Substitut für SF_6 stark vorantreiben. Dabei wurde der Schwerpunkt der Untersuchungen zunächst auf das thermische Ausschaltvermögen gelegt. Ebenso bedeutend ist jedoch das dielektrische Verhalten der Substitute. Erste Untersuchungen hierzu zeigten u.a. die Bedeutung der Wechselwirkung zwischen Isolierstoffdüsen und Löschgas auf. Bei einer schwachen axialen Beblasung des Lichtbogens kann diese Wechselwirkung zum dielektrischen Versagen führen. Im Rahmen dieser Arbeit werden daher alternative Löschgase hinsichtlich ihrer dielektrischen Wiederverfestigung untersucht.

Betreuer: Dipl.-Ing. Daniel Eichhoff, Dipl.-Ing. Andreas Kurz

Plath, Cornelius

Zustandsbeurteilung an Betriebsmitteln der

elektrischen Energieversorgung

Im Rahmen der Diplomarbeit wurde untersucht, welche etablierten Möglichkeiten zur Beurteilung des Zustandes von Betriebsmitteln eingesetzt werden können. Hierbei sollte die Möglichkeit bestehen, historische Daten, das Wissen von Herstellern und die Erfahrung von Netzbetreibern mit einzubeziehen. Eine geeignete Möglichkeit wurde implementiert und beispielhaft (z.B. anhand einer vorhandenen Datenbank) verifiziert. Abschließend sind Möglichkeiten zur monetarisierten Darstellung des Zustandes aufgezeigt worden, um die Ergebnisse dieser Abhandlung in eine Netzbewertung einfließen lassen zu können.

Betreuer: Dipl.-Ing. Christian Hille

Roder, Jochen

Spannungsebenenübergreifende Bewertung von Verteilungsnetzen unter Berücksichtigung von Elektromobilität

In vergangenen Arbeiten am IFHT sind bereits die Auswirkungen steigender Durchdringung mit Elektrofahrzeugen auf einzelne Verteilungsnetzebenen mittels Lastflussrechnung untersucht worden. Weiterhin sind unterschiedliche Ladestrategien für Elektrofahrzeuge entwickelt und an Niederspannungsnetzen bewertet worden. Aufbauend auf den bereits entwickelten Methoden wird in dieser Arbeit erstmalig die Kopplung der Spannungsebenen mit einbezogen. Die Analysen der Verteilungsnetze werden um die Detektion von Schwachstellen zum gezielten Netzausbau und um eine Redundanzbetrachtung zur Durchführung von Schaltmaßnahmen ausgeweitet. Zur Simulation steuerbarer Lasten wird die auf Basis von Multi-Agenten-Systemen ungesetzte Ladestrategie in das entwickelte Simulations- und Bewertungsmodell integriert. Als Schnittstelle dazu werden verschiedene Steuerungskonzepte entwickelt, die eine Reduktion von Betriebsmittelüberlastungen zum Ziel haben, welche sowohl

auf der Mittelspannungsebene als auch auf der Niederspannungsebene eingesetzt werden können. Durch den modularen Aufbau dieser Steuerung wird eine gezielte Entlastung der jeweilig gewünschten Spannungsebene erzielt. Ferner wird durch die Implementierung einer Stufenstellerregelung von Transformatoren eine Beeinflussung des Spannungsbandes vorgenommen. In Simulationen werden die Auswirkungen steigender Durchdringung mit Elektrofahrzeugen mit und ohne Laststeuerung gegenübergestellt, und entsprechende Empfehlungen für den Einsatz der Steuerungen gegeben. Zusammenfassend können durch den Einsatz der entwickelten Steuerungen Durchdringungen von über 50% in den untersuchten Netzen aufgenommen werden, ohne Betriebsmittel zu überlasten, wohingegen ungesteuertes Ladeverhalten bereits bei einer Penetrationsrate von 8% zu erheblichen Verletzungen führt. Nach einer kritischen Betrachtung der entwickelten Steuerungskonzepte werden Erweiterungsmöglichkeiten vorgestellt.

Betreuer: Thomas Pollok, M.Sc., Dipl.-Ing. Claas Matrose

Schaefer, Annegret

Zusammenhang von Instandhaltung und Anreizregulierung bei unterschiedlichen Asset-Management Strategien

Am 1.1.2009 ist in Deutschland Betreiber elektrischer Netze die Anreizregulierungsverordnung in Kraft getreten. Die Netzbetreiber müssen ihre jährlichen Erlöse nach der von der Bundesnetzagentur festgelegten Erlösobergrenze richten und somit mögliche Effizienzsteigerungspotentiale ausnutzen. Folglich hat die Anreizregulierung einen Einfluss auf die Instandhaltungsstrategien und auf das Investitionsverhalten der Netzbetreiber. Im Rahmen der Diplomarbeit wurde der komplette Zusammenhang von Anreizregulierung und Instandhaltung dargestellt und Auswirkun-

gen auf die Netzkomponenten analysiert. Dazu ist eine Asset Simulation für die Erlösobergrenze von Verteilnetzbetreibern entwickelt worden, welche auch modifizierte Asset-Management Strategien berücksichtigen kann.

Betreuer: Dipl.-Ing. Christian Hille

Scheefer, Christian

Technische Analyse gekoppelter Gleich- und Wechselspannungsübertragungssysteme im europäischen Verbundnetz

Die zunehmende volatile Erzeugung aus regenerativen Quellen und der durch den liberalisierten Strommarkt forcierte Handel führen zu Überlastungen des europäischen Stromnetzes. Ein Ausbau des Netzes ist unvermeidlich. Die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) bietet sich für ein Europa umspannendes überlagertes Netz zur Übertragung elektrischer Energie über lange Strecken an. Erste Verbindungen werden für die Anbindung des in Zukunft in Nordafrika erzeugten Solarstroms (Desertec Projekt) diskutiert. Die Berechnung von gekoppelten Gleich- und Wechselspannungsübertragungsnetzen erfordert Software, die AC sowie DC Komponenten modellieren und Berechnungen durchführen kann. Am Institut für Hochspannungstechnik (IFHT) sind verschiedene Softwarelösungen vorhanden, deren Nutzbarkeit für solche Rechnungen bisher nicht ausreichend untersucht worden ist. In der vorliegenden Arbeit ist eine Analyse und Bewertung der erhältlichen Softwaretools durchgeführt worden. Ein aus der Software-Ergonomie hergeleitetes Bewertungssystem betrachtet allgemein den Funktionsumfang, die Bedienbarkeit, die Visualisierung und die Flexibilität, bezieht sich aber im Speziellen auch auf die Berechnung gekoppelter Netze. Das am Institut entwickelte Modell des europäischen Übertragungsnetzes wird für eine Anbindung des Desertec-Projektes adaptiert. Da-

zu werden zwei topologische Szenarien untersucht, die eine erste HGÜ-Verbindung innerhalb Europas realisieren. Für jedes Szenario wird jeweils eine netzgeführte und eine selbstgeführte Variante eingebaut und verglichen. Die Wahl der Anschlussknoten und Übertragungsleistungen erfolgt durch die Ermittlung von Einspeisungspotentialen an jedem 380 kV Knoten des europäischen Übertragungsnetzes. Der Einbau der HGÜ-Strecken erfordert eine Portierung des Netzes von Matpower in ein für die Berechnung gekoppelter Netze geeignetes Programm. Hierzu werden verschiedene Konvertertools realisiert, welche die Daten zur Lastflussberechnung und zur optimalen Lastflussberechnung umwandeln und auch den Reimport der Ergebnisse in Matpower erlauben. Eine Bewertung der Szenarien anhand vorher identifizierter technischer Kriterien wird durchgeführt.

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

Tomm, Viktor

Ökoeffizienzbewertung elektrochemischer Speichertechnologien in Energieversorgungsnetzen

Elektrochemische Speichertechnologien sind eine Möglichkeit Systemdienstleistungen anzubieten, welche für die Netzstabilität unabdingbar sind. Die vorliegende Arbeit thematisiert den Einsatz von stationären, elektrochemischen Speichertechnologien aus Anlagensicht im Energieversorgungsnetz und soll diese sowohl ökonomisch als auch ökologisch bewerten. Dazu werden potentielle Betriebsstrategien nach wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten ausgewählt und definiert. Im Rahmen eines ganzheitlichen Ansatzes werden alle Umweltwirkungen und der ökonomische Erfolg über den gesamten Lebenszyklus betrachtet und in die Bewertung mit einbezogen. Zu diesem Zweck wird im Rahmen der Arbeit ein Modell erstellt,

welches den Betrieb eines Akkumulators abhängig von Batterietyp und Betriebsstrategie unter Einhaltung der technischen Anforderungen simuliert. Ein Modell des Regelleistungsmarkts hilft den stochastischen Charakter der dort erzielbaren Einnahmen abzubilden. Um die Emissionen der Herstellung zu erfassen, wird der Herstellungsprozess der untersuchten Batterien nachgebildet. Im Rahmen der Ergebnisauswertung werden die ausgewählten Betriebsstrategien und untersuchte Batterietypen verglichen und die die Wirtschaftlichkeit und ökologische Auswirkungen beeinflussenden Parameter identifiziert.

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

Walkenfort, Matthias

Entwicklung von Managementstrategien für Elektrofahrzeuge zur Integration in die elektrischen Verteilungsnetze

Aufgrund der zu erwartenden Entwicklung im Bereich der Elektromobilität, kommen neue Anforderungen auf die bestehende Netzstruktur zu. Gleichzeitig ergeben sich neue Möglichkeiten im Bereich der Netzführung, da die Ladezeiten der Elektrofahrzeuge in gewissen zeitlichen Grenzen variabel sind. So kann im gezielten Be- und Entladen von Fahrzeugen eine stützende Wirkung auf das Netz gesehen werden. Zur gezielten Nutzung dieses Potentials sind allerdings Mechanismen notwendig, die eine steuernde Wirkung haben und gezielt dieses Potential nutzen können. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit ein Algorithmus entwickelt, mit dessen Hilfe es möglich ist, komplexe Strategien umzusetzen. Der für die Optimierung verwendete genetische Algorithmus wird vorgestellt und erörtert. Dieses Optimierungsverfahren hat als Vorbild den natürlichen Evolutionsprozess. Hierbei wird statt nur einer Lösung eine Vielzahl an Lösungsmöglichkeiten betrachtet, die sich durch Veränderung und

Kombination untereinander iterativ zu einer optimalen Lösung entwickeln. Durch das Einbinden von Schnittstellen besteht die Möglichkeit, einen Optimierungsansatz losgelöst von einer Fahrsimulation zu entwickeln. Auf Grundlage synthetischer Daten erfolgt abschließend die Verifikation, sowohl des gesamten Optimierungsalgorithmus, als auch spezieller Teilfunktionalitäten. Hierbei hat sich gezeigt, dass der entwickelte Algorithmus gut zur Lösung komplexer Fragestellungen geeignet ist und als ein sehr robustes Werkzeug angesehen werden kann.

Betreuer: Thomas Pollok, M.Sc., Dipl.-Ing. Claas Matrose

Wasowicz, Bartholomäus

Entwicklung einer integrierten handelsbasierten Einsatz- und Ausbauplanung des deutschen Kraftwerksparks unter ökologischen Kriterien

Im Fokus dieser Diplomarbeit steht die Bestimmung der zukünftigen Zusammensetzung von Kraftwerksparks und der Erzeugungsstruktur bis zum Jahr 2030 unter Integration der aktuellen Trends in der Energieversorgung, insbesondere der energiepolitischen Rahmenbedingungen. Hauptziel ist daher die Entwicklung eines Modells zur langfristigen Ausbauplanung des deutschen Kraftwerksparks. Zur realitätsnahen Simulation von Neubau-Investitionen in Kraftwerke wird eine agentenbasierte Vorgehensweise entwickelt. Dieses Verfahren ermöglicht die Modellierung jahreszyklischer Ausbauentscheidungen auf der Grundlage des Barwertes einer Investition als ökonomisches Kriterium. Der Ausbau erneuerbarer Energien als exogene Größe wird mit Hilfe sich verändernder residualer Lasten abgebildet. Als zentraler Bestandteil des Modells wird eine Kraftwerkseinsatzplanung unter Berücksichtigung technischer und ökonomischer Restriktionen zur Bestimmung von Erlösen eines Agenten im li-

beralisierten Elektrizitätsmarkt eingesetzt. Basierend auf einer Analyse signifikanter Einflussgrößen auf die Kraftwerksparkentwicklung wird die Simulation für verschiedene Szenarien durchgeführt. Als Ergebnis wurden stark veränderte Anforderungen für den zukünftigen Betrieb von Kraftwerken ermittelt. Durch sinkende und zeitweise negative residuale Lasten mit hoher Volatilität steigt der Bedarf an flexibel einsetzbaren Kraftwerken. Bis 2030 sinkt die gesamte thermische installierte Leistung in allen untersuchten Szenarien im Vergleich zu 2010, während die installierte Leistung von gasbetriebenen Kraftwerken in allen Untersuchungen zunimmt. Trotz Ausbaus erneuerbarer Energien konnte die Erfüllung der CO₂-Reduktionsziele der Bundesregierung nur in einem Szenario mit verlängerten Laufzeiten von Kernkraftwerken beinahe realisiert werden.

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

Wei, Yingze

Untersuchung des Einflusses der Netzwerkimpedanz auf das thermische Ausschaltvermögen eines Leistungsschaltermodells

Das Ausschaltvermögen von Leistungsschaltern ist unter anderem von der Netzwerkimpedanz, die zum Zeitpunkt der Schalthandlung vorliegt, abhängig. Somit ergibt sich je nach vorliegendem Schaltfall - welcher durch die Netz und den ggf. aufgetretenen Fehler bestimmt wird - ein variierendes Ausschaltvermögen des Leistungsschalters. In der Literatur wird ein Zusammenhang von Netzwerkimpedanz und Ausschaltvermögen für bestehende SF₆ Leistungsschalter angegeben. Dieser wird auf seine Anwendbarkeit für den am Institut vorliegenden Fall untersucht. Im Rahmen der Diplomarbeit wird die Abhängigkeit des Ausschaltvermögens des am Institut vorhandenen Modellschalters von der Netzwerkimpedanz bestimmt und mit vor-

handener Literatur verglichen.

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

Winter, Sebastian

Analyse und Modellierung der Auswirkungen technologischer Innovationen auf die europäischen Energieversorgungsstrukturen

Inhalt dieser Arbeit ist die Analyse innovationsgetriebener Entwicklungsprozesse des europäischen Energieversorgungssystems. Dazu werden zunächst die wesentlichen Einflussfaktoren ermittelt, wobei auch sozioökonomische Einflussgrößen Berücksichtigung finden. Im Anschluss werden diese in ein geschlossenes Modell zur Simulation der zukünftigen technologischen und infrastrukturellen Entwicklungen in Europa überführt. Die Modellierung der Innovationsprozesse basiert dabei auf dem Konzept der Erfahrungskurve, die in dieser Arbeit um Abbildungsmöglichkeiten für Entwicklungsinterdependenzen weiterentwickelt wurde. Aus den Ergebnissen von mit dem Modell gerechneten Szenarien wird abschließend auf einen starken Ausbau der regenerativen Stromerzeugungstechnologien und der Hochspannungsgleichstromübertragung in Europa geschlossen.

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

Zhang, Jingxuan

Technical and economical Analysis of possible V2G services for electrical vehicles

Electric vehicles (EVs) can store or feed energy back to the grid when they are plugged in. For this reason, EVs have the capability to provide ancillary services to the grid in a large population. This thesis focuses on the investigation of technical potential and economic profitability in pro-

viding grid regulating services by electric vehicles. At the beginning, technical requirements of German regulating service market and constraints in the distribution grid have been analyzed. Based on this analysis, a technical model was developed, in order to simulate the process of providing grid regulating services by EVs. Then an economic model has been developed by taking into account additional battery degradation cost and bidding strategies on the regulating market, in order to explore maximum profits which can be created by EVs. In addition, service strategies and service modes in providing positive regulating service in both unidirectional and bidirectional way have been presented and compared. Afterwards, required number of EVs according to different requirements and profit range per EV has been calculated. The technical and economic models developed in this thesis can be applied in the planning of V2G services. The calculated profit created by EVs in kinds of regulating services and their required EV numbers would give a reference to the potential V2G service organizer.

Betreuer: Dipl.-Wirt.-Ing. Eva Szczechowicz, Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Thomas Dederichs

Masterarbeiten

Chitamara, Nuttawoot

Störlichtbögen in elektrischen Anlagen - Gültigkeitsgrenze der Druckberechnungsverfahren

Störlichtbögen in elektrischen Anlagen bewirken einen plötzlichen Druckanstieg, der zu mechanischen Belastungen für die Schaltanlage und die Wände des Schaltanlagenraums führt, wobei unter Umständen deren Festigkeitswerte überschritten werden können. Um die Druckbelastung im Störlichtbogenfall für eine spezifische

Anlage vorhersagen zu können, werden Druckberechnungsverfahren eingesetzt. Hierzu stehen zwei unterschiedliche Verfahren zur Verfügung: Im ersten Verfahren, dem CFD-Verfahren, wird die Finite Elemente Methode genutzt, um anhand eines Modells räumlich aufgelöste Druckverläufe zu erhalten. Bei zweiten Verfahren, dem sogenannten Standardverfahren werden die Druckverläufe für die verschiedenen Volumina einer Anlage räumlich gemittelt berechnet. Dabei sind der Aufwand und die Berechnungsdauer jedoch um ein Vielfaches geringer im Vergleich zum CFD-Verfahren. Unter der Berücksichtigung geometrischer Randbedingungen werden in dieser Arbeit die Gültigkeitsgrenzen des mittelnden Verfahrens untersucht. Hierzu werden die Berechnungsergebnisse aus dem CFD-Verfahren und dem Standardverfahren unter der Variation diverser Anlagenparameter miteinander verglichen.

Betreuer: M.Sc.Kittipong Anantavanich, Dipl.-Ing. Daniel Eichhoff

Hartanti, Hesti

Entwicklung von einem Modell zur kontinuierlichen Zustandsbewertung der Feststoffisolation von Transformatoren mit dem Fuzzy-Logik-Ansatz

Der Zustand von Feststoffisolatoren wird, aufgrund dessen Einfluss auf die Alterung von Leistungstransformatoren, genau betrachtet. Obwohl mehrere relevante Faktoren der Feststoffisolatoren kontinuierlich mittels eines Online-Monitoring-Systems erfasst werden können, wird hier ausschließlich den thermischen Faktor für das Alterungsmodell berücksichtigt. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Modells zur umfangreichen Diagnose mit Hilfe von allen verfügbaren Faktoren (z.B. Temperatur, Feuchte- und Gasgehalt im Öl). Ein Fuzzy-Logik-Ansatz wird zur Zustandsbewertung der Feststoffisolator von Lei-

stungstransformatoren angewendet.
Betreuer: M.Sc. Tirinya Cheumchit

Lund, Johan

Untersuchung und Modellierung von Schalttechnologien für die Anwendung in HVDC- Leistungsschaltern

Für zukünftige Elektrizitätsnetze, die auf der Gleichstromtechnologie (DC, direct current) basieren werden entsprechende Schaltgeräte in Form von Leistungsschaltern benötigt, um einen sicheren Betrieb sowohl im Normalzustand als auch im Fehlerfall zu gewährleisten. Die heute in den Wechselstromnetzen eingesetzten Leistungsschalter sind hierzu wegen ihres Funktionsprinzips der Stromunterbrechung im natürlichen Nulldurchgang ungeeignet. Durch die Nichtverfügbarkeit geeigneter Schaltgeräte für die Mittel- und Hochspannungsebene wird der Aufbau der Gleichstrom-Netze behindert, sodass die Entwicklung von DC-Leistungsschaltern angestrebt wird. Für DC-Leistungsschalter bestehen verschiedene Konzepte wie z.B. leistungselektronische Schalter oder sog. ultra-fast-switches mit zusätzlichen Resonanzkreisen, um einen künstlichen Nulldurchgang zu erzeugen. Aufgrund der Vielzahl an möglichen Technologien ist ein systematischer Vergleich notwendig, um die Entwicklung eines DC-Leistungsschalters gezielt voranzutreiben. Verschiedene Komponenten und Konzepte, insbesondere sog. Hybrid-Topologien werden hierzu unter Berücksichtigung technischer sowie ökonomischer Aspekte bewertet. Hierzu werden mit Hilfe von Simulationsmodellen die transienten Vorgänge während der Gleichstrom-Unterbrechung analysiert. Ziel dieser Arbeit ist es, auf Basis der Analyse eine geeignete Schalter-Topologie für die Realisierung eines DC-Leistungsschalters zu identifizieren.

Betreuer: Dipl.-Ing. Daniel Eichhoff, Dipl.-Ing. Andreas Kurz

Makhfud, Imam

Auswertung historischer Daten aus Monitoring-Systemen von Leistungstransformatoren

Umfangreiche Analysen von Daten aus mehreren Prozessvariablen und Transformatoren können wichtige Aktivitäten bezüglich Leistungstransformatoren unterstützen, wie z.B. Zustandsbewertung. Diese Daten werden aber meistens an unterschiedlichen Zeitstempeln und Zeitfenstern abgespeichert. Daher ist es nicht möglich diese Daten für eine weitere Analyse direkt zu verwenden. In Rahmen dieser Arbeit wird einen Ansatz zur Verarbeitung historischer Daten aus Monitoring-Systemen zur Unterstützung von umfangreichen Analysen entwickelt. Darüber hinaus, zur Verifikation des Ansatzes werden Daten aus verschiedenen Transformatoren umfangreich analysiert.

Betreuer: M.Sc. Tirinya Cheumchit

Muhaimin, Emir

Entwicklung eines Entwurfs zur Mustererkennung für Monitoring-Daten von Leistungstransformatoren

Die Aufgabe von Online-Monitoring-Systemen ist grundsätzlich die kontinuierliche Überwachung wichtiger Komponenten wie Leistungstransformatoren. Relevante erfasste und berechnete Daten werden in Zeitreihen als historischen Daten abgespeichert. Allerdings kann unter Umständen die Kommunikation zwischen Monitoring-System und Transformator unterbrochen werden und daher werden Daten in bestimmten Zeitintervallen nicht erfasst. Das Hauptziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Ansatzes zur Erkennung des Musters von Zeitreihen-Daten aus dem Monitoring-System, sodass mögliche Leerstellen mit gefüllt werden können. Verschiedene Prozessvariablen müssen zunächst klassifiziert werden und dann kann das Muster von den

Beispielprozessvariablen aus jeder Klasse erkannt werden. Weiterhin muss die Genauigkeit der synthetischen Daten untersucht werden.

Betreuer: M.Sc. Tirinya Cheumchit

Offermann, Michael

Indirekte Untersuchung des Einflusses der Netzwerkimpedanz auf das Ausschaltvermögen eines Leistungsschaltermodells mit alternativer Beblasung

Innerhalb eines Leistungsschalters wird der Lichtbogen in einer Isolierstoffdüse geführt. Der Abbrand dieser Düsen ist maßgeblich für den Druckaufbau des Leistungsschalters. Die heutige Generation von Leistungsschaltern ist so konstruiert, dass hauptsächlich zylindersymmetrische Isolierstoffdüsen verwendet werden, um den Lichtbogen zu führen. Der Lichtbogen wird zum Zeitpunkt des Stromnulldurchgangs mit dem verwendeten Löschgas, zumeist Schwefelhexafluorid (SF₆), axial beblasen. Es ist bekannt, dass das Ausschaltvermögen eines Leistungsschalters mit axialer Lichtbogenkühlung mit verschiedenen Größen, wie z.B. dem Druck oder der Netzwerkimpedanz, korreliert. Dieser Einfluss ist für eine nicht axiale Beblasung noch nicht nachgewiesen. In dieser Arbeit wird ein Versuchsaufbau entwickelt, mit dem indirekt der Einfluss der Netzwerkimpedanz auf das Ausschaltvermögen eines Leistungsschaltermodells mit alternativer Beblasung untersucht wird. Dieser Einfluss soll anhand mehrerer Versuchsreihen mit variierenden Parametern bestimmt werden.

Betreuer: Dipl.-Ing. Daniel Eichhoff, Dipl.-Ing. Matthias Hoffacker

Srisupha, Montri

Diagnose der Unterbrechereinheiten von Leistungsschaltern mittels einer Frequenzganganalyse

Die zustandsbasierte Instandhaltung be-

nötigt detaillierte Information über den Zustand aller wichtigen Komponenten von elektrischen Betriebsmitteln. Bei Leistungsschaltern sind Düsen- und Kontaktsysteme für ein korrektes Abschalten des Stroms verantwortlich. Insbesondere muss die Düse visuell überprüft werden, was eine zeitaufwändige Zerlegung der Pole erfordert. Die Frequenzganganalyse (FGA) bietet die Möglichkeit Veränderungen in kapazitiven, induktiven oder ohmschen Anordnungen zu erfassen. Diese Methode ermöglicht Änderungen in den Wartungsmaßnahmen durchführen zu können.

Betreuer: Dipl.-Ing. Christian Hille

Wild, Tobias

Untersuchungen zum Lichtbogenwiderstand in Leistungsschaltern zum Zeitpunkt des Stromnulldurchgangs

In Hochspannungs-Leistungsschaltern werden Lichtbögen innerhalb von Isolierstoffdüsen geführt und durch die Beblasung mit Gas gekühlt. Diese Beblasung sorgt kurz vor dem natürlichen Stromnulldurchgang für einen Anstieg des Lichtbogenwiderstands. Die Höhe des Widerstands ist entscheidend für eine erfolgreiche Schalthandlung des Leistungsschalters. Im Rahmen der Masterarbeit wird eine Methode entwickelt und umgesetzt, die es erlaubt die dynamische Entwicklung des Lichtbogenwiderstands im Zeitbereich des Stromnulldurchgangs zu untersuchen. Hierbei wird insbesondere berücksichtigt, dass zukünftig neben dem Gesamtwiderstand der Schaltstrecke auch dessen örtliche Verteilung erfasst werden soll.

Betreuer: Dipl.-Ing. Matthias Hoffacker

Bachelorarbeiten

Adler, Sophie

Ganzheitliche Analyse und Optimierung

des Erzeugungsmanagements von Windenergieanlagen mittels raum-zeitlicher stochastischer Modelle

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

Bennewitz, Florian

Szenarioanalyse der Entwicklung des deutschen Hoch- und Höchstspannungsnetzes unter ökologischen Kriterien

Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Helmschrott,
Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Thomas Dederichs

Bongers, Tim Dominik

Untersuchungen zur Bestimmung der technischen Anforderungen für Leistungsschalter in zukünftigen DC-Netzen

Betreuer: Dipl.-Ing. Daniel Eichhoff, Dipl.-Ing. Andreas Kurz

Bredtmann, Christian

Entwicklung adaptiver Multi-Agenten-Systeme unter Betrachtung von Elektromobilität

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

Erlinghagen, Philipp

Entwicklung einer Methode zur topologischen Analyse und Generierung von synthetischen Mittelspannungs- Verteilungsnetzstrukturen

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

Falke, Tobias

Analyse und Modellierung von Betriebsstrategien von Energiespeichern für den Einsatz in intelligenten Verteilungsnetzen

Betreuer: Dipl.-Ing. Stefan Krenzel, Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Thomas Dederichs

Frankeser, Sophia Johanna

Mathematische Methoden zur Bestimmung der Betriebsmittellanzahl in elektrischen Netzen

Betreuer: Dipl.-Ing. Christian Hille

Frechen, Henning

Entwicklung eines Algorithmus zur Kompensation der akustischen Schalldämpfung in VPE

Betreuer: Dipl.-Ing. Gregor Brammer

Gaßmann, Tim

Analyse des Schadensverhaltens von Höchstspannungs-Trennschaltern

Betreuer: Dipl.-Ing. Christian Hille

Grüneberg, Philipp

Ökologische Analyse des Einflusses von Elektrofahrzeugen auf die Städtereion Aachen

Betreuer: Dipl.-Wirt.-Ing. Eva Szczechowicz, Dipl.-Ing. Thomas Helmschrott

Haverkamp, Philip

Szenarioanalyse zum Einfluss der Kommunikationstechnik auf zukünftige Smart Grid Infrastrukturen

Betreuer: Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Thomas Dederichs, Dipl.-Ing. Markus Jordans

Heinemann, Antonia

Analyse des Einflusses von Elektrofahrzeugen auf die V2G-Einnahmen am zukünftigen Regelleenergiemarkt

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

Heyn, Martin

Auslegung und Bewertung verschiedener Isolations- und Schutzkonzepte für Hochspannungsbatterie-speichersysteme zur Pufferung volatiler Energiequellen

Betreuer: Dipl.-Ing. Christoph Roggendorf

Hinnenkamp, Mirco

Wirtschaftlich-technische Analyse von Lastmanagement in Versorgungssystemen mit dezentraler Energiewandlung

Betreuer: Dipl.-Ing. Stefan Krengel, Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Dederichs

Lauer, Anna Katharina

Bewertung von Methoden zur Lebenszyklusanalyse in Hinblick auf deren Anwendung in Systemen der dezentralen Energiewandlung

Betreuer: Dipl.-Ing. Stefan Krengel, Dipl.-Wirt.-Ing. Eva Szczechowicz

Möller, Robert

Analyse des Einflusses verschiedener Elektromobilitätsinfrastrukturen auf Kunden und Netzbetreiber im Hinblick auf Aufstellungs-ort und Kapazitätsbedarf

Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Helmschrott, Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Dederichs

Mühlbeier, Artur

Theoretische Untersuchungen zur Modellierung der dielektrischen Wiederverfestigung in Isolierstoffdüsen

Betreuer: Dipl.-Ing. Daniel Eichhoff, Dipl.-Ing. Andreas Kurz

Reißing, Daniel

Beitrag zur Abschätzung der Betriebsmittellanzahl in elektrischen Netzen mittels synthetischer Netzplanung

Betreuer: Dipl.-Ing. Tilman Wippenbeck

Shanmugalingam, Suganthan

Simulative Untersuchung eines Selbstblasleistungsschalters

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

Siegler, David

Analyse des Einflusses ortsbezogener Subventionen auf die Entwicklung erneuerbarer Energieträger

Betreuer: Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Dederichs, Dipl.-Wirt.-Ing. Baris Özalay

Zurmühlen, Sebastian

Modellierung des elektromobilen Verkehrs unter Berücksichtigung sozio-ökonomischer Daten und Analyse der Auswirkungen auf elektrische Verteilungsnetze

Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Helmschrott, Dipl.-Wirt.-Ing. Eva Szczechowicz

Studienarbeiten

Brust, Martin

Voruntersuchungen zu elektrischen und mechanischen Eigenschaften von syntaktischem Schaum auf Basis flexibel formulierter Epoxidharze

Betreuer: Dipl.-Ing. Christoph Roggendorf

Buß, Stefan

*Untersuchung des Einflusses der Düsen-
geometrie auf das Ausschaltvermögen eines
Selbstblasleistungsschaltermodells*

Betreuer: Dipl.-Ing. Matthias Hoffacker,
Dipl.-Ing. Ming Tang

Frehn, Tobias

*Untersuchung des Prüfkreiseinflusses auf
das Ausschaltvermögen eines Leistungs-
schaltermodells*

Betreuer: Dipl.-Ing. Matthias Hoffacker,
Dipl.-Ing. Matthias Behle

Schneider, Jurij

*Ermittlung des Einflusses von Alkali-Ionen
auf die Feuchtigkeitsaufnahme von syntak-
tischem Schaum*

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

Vobis, Daniel

*Untersuchung der Eignung von syntakti-
schem Schaum auf Basis von flexibel formu-
lierten Epoxidharzen als Hochspannungs-
isolierstoff*

Betreuer: Dipl.-Ing. Christoph Roggendorf

Weiß, Beatrix

*Messung der Temperatur im Heizvolumen
eines Selbstblasleistungsschaltermodells*

Betreuer: Dipl.-Ing. Matthias Hoffacker

Projektarbeiten

Iloba, Nnamdi

*Einflussfaktoren auf den Zustand der Kom-
ponenten von Leistungstransformatoren*

Betreuer: M.Sc. Tirinya Cheumchit

Seminar Hoch- und Mittelspannungsschaltgeräte und -anlagen

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

Auch in diesem Jahr wurde wieder das Seminar „Hoch- und Mittelspannungsschaltgeräte und -anlagen“ am 21. und 22. Juni 2010 angeboten. Das Seminar wird seit einigen Jahren vom Institut für Hochspannungstechnik in Zusammenarbeit mit dem VDE Regio Aachen, der Forschungsgemeinschaft für elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e.V. Mannheim und der RWTH International Academy GmbH durchgeführt und erfreut sich jedes Jahr einer steigenden Nachfrage. Dieses Jahr nahmen rund 60 Personen aus der Industrie und von Versorgungsunternehmen, sowie rund 120 wissenschaftliche Mitarbeiter und Studenten des IFHT an der Veranstaltung teil. Für diese zweitägige Weiterbildungsveranstaltung wurde der hauseigene Hörsaal Eph gebucht.



Abb. 1: Veranstaltungsraum Hörsaal Eph

Während der zweitägigen Veranstaltung wurde der Themenbereich Schaltgeräte und

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



Abb. 2: Referenten: Dr.-Ing. Martin Schumacher (links), Dipl.-Ing. Frank Hofmann (rechts)

Es folgt ein Überblick über das diesjährige Seminarprogramm:

- **Begrüßung**
Prof. Dr.-Ing. Armin Schnettler,
RWTH Aachen, Institut für Hochspannungstechnik
- **Einführung in die Thematik**
Dr.-Ing. Martin Schumacher,
ABB Schweiz AG Hochspannungsprodukte, Zürich
- **Schaltlichtbögen**
Dr.-Ing. Martin Kriegel,
ABB Schweiz AG, Zürich
- **SF₆-Hochspannungsleistungsschalter**
Dipl.-Ing. Nils Werning,
Siemens AG Energy Sector, Schaltwerk Berlin
- **Vakuumschalter**
Dr.-Ing. Dietmar Gentsch,
ABB AG Calor Emag Mittelspannungsprodukte, Ratingen
- **Hochspannungssicherungen**
Dipl.-Ing. Johannes-Georg Gödeke,
SIBA GmbH & Co. KG, Lünen
- **Anlagen der Hochspannungsgleichstromübertragung**
Dr.-Ing. Jutta Hanson,
ABB AG, Mannheim
- **Einführung in die Anlagentechnik und gasisolierte Schaltanlagen**
Dr.-Ing. Martin Schumacher,
ABB Schweiz AG Hochspannungsprodukte, Zürich
- **Freiluftschaltanlagen**
Dipl.-Ing. Gerd Lingner,
Siemens AG, Energy Sector, Power Transmission Division, Erlangen
- **Ortsnetzstationen**
Dipl.-Ing. Gisbert Brüggemann,
Viva Electrical!, Wetter

- **Leistungstransformatoren**
Dipl.-Ing. Frank Hofmann,
AREVA Energietechnik GmbH,
Mönchengladbach
- **Mittelspannungsschaltanlagen**
Dr.-Ing. Stefan Göttlich,
ABB AG Calor Emag Mittelspannungsprodukte, Ratingen
- **Kabel und Freileitungen**
Dr.-Ing. Frank Merschel,
RWE Rheinland Westfalen Netz AG,
Essen
- **Störungsgeschehen von Betriebsmitteln der Elektrizitätsversorgung**
Prof. Dr.-Ing. Armin Schnettler,
RWTH Aachen, Institut für Hochspannungstechnik

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

Kontakt

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

Seminar Schutz- und Leittechnik

Das erstmals an der RWTH Aachen angebotene Seminar "Schutz- und Leittechnik" fand vom 14.-18. November 2010 auf Einladung der Firma OMICRON electronics GmbH in Vorarlberg, Österreich statt. Ziel des Seminares ist es, Studierende vor allem der energietechnischen Vertiefungsrichtungen einen praxisnahen Einblick in die spezielle Welt der Schutz- und Leittechnik in elektrischen Netzen zu geben.

Reflektion der RWTH Aachen

Auf Basis der freundlichen Einladung der OMICRON electronics GmbH konnte im Wintersemester 2010-2011 zehn interessierten Studierenden der RWTH Aachen erstmals das Seminar "Schutz- und Leittechnik" angeboten werden. Die in einem Bewerbungsverfahren ausgewählten, hochmotivierten Studierenden deckten ein breites Spektrum energietechnischer Ausrichtungen und schutz- und leittechnischer Vorerfahrung ab.

Dieser Gruppe begegnete mit Herrn Rainer Luxenburger von OMICRON electronics ein geübter und in der Materie sehr erfahrener Referent. In den drei Seminartagen machte Herr Luxenburger durch Vorträge, angeregte Frage- und Diskussionsrunden sowie praktische Vorführungen die theoretische und praktische Welt insbesondere der Schutztechnik für die Studierenden greifbar. Dabei veranschaulichte Herr Luxenburger neben selektierten Themen des klassischen Netzschutzes auch kommende Herausforderungen durch die Integration dezentraler Erzeuger und Speicher. Zur weiteren Vertiefung der Seminarinhalte dienen Ausarbeitungen der Studierenden im Nachgang der Veranstaltung. Die Besichtigung der Schaltanlage Bürs der Vorarlberger Kraftwerke AG veranschaulichte die Seminarinhalte nochmals im systemischen Kontext. Mit der exzellenten Unterbringung und Verpflegung der Seminargruppe auf dem Seminarhaus fibe in Laterns wurde eine hervorragende leibliche, atmosphärische und gesellige Basis für ein erfolgreiches Se-

minar und für die notwendige Regeneration geschaffen. Ein abwechslungsreiches abendliches Rahmenprogramm sorgte nach dichten Seminartagen für Erfrischung und bot Gelegenheit zum näheren Kennenlernen. Die Studierenden hatten in Gesprächen und im Rahmen einer Führung die Gelegenheit, ihren Eindruck von OMICRON electronics zu vertiefen und die hervorragenden Arbeitsbedingungen ebenso wie das Tätigkeitsfeld von OMICRON electronics näher kennen zu lernen.

Wir bedanken uns nochmals für die Einladung der OMICRON electronics GmbH und das gelungene Seminar. Persönlich danken möchten wir Herrn Luxenburger als Referenten sowie Frau Erika Fimpel für die hervorragende Organisation und Betreuung vor Ort. Wir freuen uns auf die weitere Zusammenarbeit und das nächste Seminar.

Unser Dank gilt an dieser Stelle auch der Vorarlberger Kraftwerke AG für die freundliche Ermöglichung der Führung im Umspannwerk Bürs durch zwei langjährig erfahrene Spezialisten.

Reflektion der OMICRON electronics GmbH

"Wir haben uns sehr gefreut, dass die RWTH Aachen unserer Einladung zum Seminar "Schutz- und Leittechnik" bei uns in Vorarlberg gefolgt ist. Da uns die Kooperation mit dem IFHT viel bedeutet, war es uns ein besonderes Anliegen, mit einer praxisnahen Vorlesung durch unseren Experten Rainer Luxenburger einer sehr motivierten und interessierten Gruppe von Studieren-



Abb. 1: Gruppenaufnahme

den die Schutztechnik näher bringen zu dürfen.

Neben der intensiven Vorlesung hatten die Studierenden auch Gelegenheit, im Umspannwerk in Bürs den Schutz zu besichtigen und dadurch die Theorie in der Praxis zu sehen. Wir haben auch versucht, den Studierenden einen kleinen Einblick in die Firma OMICRON zu vermitteln und mit dem Abendprogramm das Seminar hoffentlich etwas aufgelockert. Wir würden uns freuen,

auch nächstes Jahr eine ebenso motivierte Studierendengruppe bei uns begrüßen zu dürfen und freuen uns natürlich auch auf eine weiterhin gute Zusammenarbeit mit dem IFHT."

Kontakt

Dipl.-Ing. Tilman Wippenbeck
wippenbeck@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-90015

Das Institut



Chronik 2010

04.01.10

Erster Arbeitstag von Mathias Knaak, Jens Knauel, Daniel Winkel

11.01.10

Erster Arbeitstag von Johannes Stüeken

15.01.10

Erster Arbeitstag von Thomas Helmschrott, Baris Özalay

15.01.10

Besuch der Firma CONSENTEC mit Institutsführung
Armin Schnettler und Christian Hille

15.01.10

Teilnahme am FGLA-Kolloquium „Elektromobilität“
Stefan Federlein, Thomas Smolka, Bernhard Schowe-von der Brelie

17.01.10

Letzter Arbeitstag von Martin Splettstößer

29.01.10

Letzter Arbeitstag von Walter Taeter

28.01. - 03.02.10

DAAD-Vorauswahlsitzung für Stipendientenbewerber (Forschungsstipendien) aus der russischen Föderation und Auswahlgespräche mit Bewerbern für Studienstipendien (Masterprogramm) in Moskau
Teilnehmer: Gerhard Pietsch

01.02.10

Erster Arbeitstag von Stefan Krengel, Tilman Schmidt

03.02.10

Besuch von Prof. Dr. Mihai Cernat, University of Brasov, Rumänien am IFHT

05.02.10

Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses zum AiF-Vorhaben „Reduzierung der Druckbeanspruchung elektrischer Anlagen im Störlichtbogenfall“ in Aachen

Teilnehmer: Gerhard Pietsch, Kittipong Anantavanich, Daniel Eichhoff

14.02.10

Hochspannerball am IFHT

18.02.10

Auswahlsitzung der Mummert-Stiftung (Führungskräftenachwuchs) für Stipendiaten aus osteuropäischen Staaten in Köln
Teilnehmer: Gerhard Pietsch

20.02. - 02.03.10

Armin Schnettler hält eine Vorlesung an der TGGs in Bangkok

24.02. - 02.03.10

Christian Hille besucht die TGGs in Bangkok

01.03. - 31.03.10

Die Doktoranden Viktor Belko und Yuri Soloviev der Staatlichen Polytechnischen Universität St. Petersburg, Russland, besuchen das Institut zu einem Studienaufenthalt im Rahmen des Leonhard-Euler-Projekts „Untersuchungen von Komponenten der Hochspannungstechnik“

05.03.10

Promotionsprüfung von Kittipong Anantavanich zum Thema „Calculation of pressure rise due to internal arcs considering SF₆-air mixtures and arc energy absorbers“
Referent: Gerhard Pietsch, Korreferent: Hans-Jürgen Haubrich

05.03.10

Promotionprüfung von Ming Chark Tang zum Thema „Widerstandsverteilung von Schaltlichtbögen in Selbstblasleistungsschaltern während der Stromnulldurchgangsphase“
Referent: Armin Schnettler, Korreferent: Michael Kurrat

13.03. - 18.03.10

Auswahl Aserbaidzschan Regierungsstipen-

diaten (unter Beteiligung des DAAD) in Baku/Aserbaidschan

Teilnehmer: Gerhard Pietsch

19.03. - 27.03.10

CIGRE-Working Group Meeting A3.24 (Störlichtbogensimulation) sowie CIGRE Technical Seminar „Modelling and Testing of Transmission and Distribution Switchgear“ in Brisbane/Australien

Vortrag von Gerhard Pietsch

25.03.10

Workshop „Aachen als Modellregion für Elektromobilität“, Tivoli Aachen

Vortrag von Armin Schnettler

29.03.10

Schülerpraktikum im mathematisch-physikalischen Bereich

Martin Statz, Einhard-Gymnasium Aachen

27.04.10

DKE Tagung „Die Zukunft elektrisiert!“ in Offenbach

Vortrag von Armin Schnettler

29.04.10

Promotionsprüfung von Stefan Federlein zum Thema „Modellierung des typspezifischen Störungsaufkommens von Hochspannungs-Schaltgeräten“

Referent: Armin Schnettler, Koreferent: Gerd Balzer

30.04.10

Letzter Arbeitstag von Kittipong Anantavanich

30.04.10

Letzter Arbeitstag von Ming Tang

03.05.10

Erster Arbeitstag von Sebastian Winter

06.05. - 08.05.10

DAAD Auswahlstipendium Studienstipendien für Absolventen Deutscher Auslandsschulen (Neuanträge) in Bonn-Bad Godesberg
Teilnehmer: Gerhard Pietsch

10.05.10

Erster Arbeitstag von Jenny Jaensson-

Weidner

15.05.10

Mannheim Marathon, Organisator: Christoph Roggendorf

Teilnehmer: Jan Becker, Florian Bennewitz, Tim Bongers, Christian Bredtmann, Ilka Bremer, Denys Demenko, Daniel Eichhoff, Andreas Höwedes, Claas Matrose, Robert Möller, Armin Schnettler, Johannes Stücken, Beatrix Weiß, Daniel Winkel

24.5. - 28.05.10

Pfingstexkursion

25.05.10

Erster Arbeitstag von Frederik Kalverkamp

31.05.10

Letzter Arbeitstag von Thomas Smolka und Mathias Behle

01.06. - 04.06.10

BMBF - Reise Shanghai, China

Teilnehmer: Armin Schnettler

03.06.10

Auszeichnung von Bartholomäus Wasowicz und Fabian Potratz für die Projektidee zu „Plug Into Future“ beim Wettbewerb für Studierende des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) „Energie für Ideen“

Betreuer: Thomas Dederichs

15.06.10

Prof. Szkutnik, Prof. Kocak am IFHT

21.06. - 22.06.10

Seminar „Hoch- und Mittelspannungsschaltgeräte und -anlagen“

Leiter: Martin Schumacher

29.06.10

2. Kongress zur Smart Grids, dem Internet der Energie und der intelligenten Elektromobilität, im Eurogress Aachen

Vortrag von Thomas Dederichs

01.07.10

Erster Arbeitstag von Jochen Roder und Michael Kippen

02.07.10

Promotionsprüfung von Michael Keßler zum Thema „Einsatz von elastischen syntaktischen Schäumen in der Hochspannungstechnik“

Referent: Armin Schnettler, Korreferent: Volker Hinrichsen

02.07. - 04.07.10

Segelwochenende des IFHT am Veerse Meer

09.07. - 10.07.10

DAAD Auswahlstipendium Studienstipendien für Absolventen Deutscher Auslandsschulen (Verlängerungen) in Bonn-Bad Godesberg

Teilnehmer: Gerhard Pietsch

12.07.10

Promotionsprüfung von Jörg Feldmann zum Thema „Planungsgrundsätze für Niederspannungsnetze unter Berücksichtigung von Versorgungsqualität und Kosten“

Referent: Hans-Jürgen Haubrich, Korreferent: Armin Schnettler

02.08.10

Erster Arbeitstag von Sepideh Doroudian und Bernhard Fuchs

18.08.10

IFHT Betriebsausflug ins Ahrtal, Regierungsbunker Bad Neuenahr, Weinprobe und Führung bei der Winzergenossenschaft Mayschoss

21.08.10

Rad am Ring, Nürburgring

Teilnehmer: Christian Hille, Matthias Hoffacker, Tobias Küter, Lutz Malchus, Claas Matrose, Mark Meuser, Andreas Nolde, Thomas Pollok, Ralf Puffer, Christoph Roggendorf, Daniel Schacht, Oliver Scheufeld, Armin Schnettler

22.08. - 27.08.10

CIGRÉ Session 2010 in Paris

Teilnehmer: Thomas Dederichs, Stefan Federlein, Ralf Puffer, Armin Schnettler

22.08. - 24.08.10

CIGRE-Working Group Meeting A3.24 (Störlichtbogensimulation) in Paris

Teilnehmer: Gerhard Pietsch

01.09.10

Erster Ausbildungstag von Volker Lontzen

03.09. - 18.09.10

Exkursion nach Australien

Teilnehmer: Gregor Brammer, Thomas Dederichs, Stefan Federlein, Christian Hille, Matthias Hoffacker, Maximilian Keller, Michael Keßler, Andreas Kurz, Andrey Mashkin, Claas Matrose, Gerhard Pietsch, Thomas Pollok, Ralf Puffer, Christoph Roggendorf, Martin Scheufen, Armin Schnettler, Anja Strauchs, Eva Szczechowicz

06.09. - 11.09.10

„International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis“ (CMD 2010) in Tokyo (Japan)

Teilnehmerin: Tirinya Cheumchit

15.09.10

Erster Arbeitstag von Rita Kurth

28.09. - 30.09.10

DAAD-Stipendiatenseminar für Absolventen deutscher Auslands- und Sprachdiplomschulen in Berlin

Vortrag von Gerhard Pietsch

30.09.10

Letzter Arbeitstag von Jenny Jaensson-Weidner

30.09.10

Übergabe der E-Fiat 500 an Institute der RWTH Aachen (zwei Autos an das IFHT) unter Teilnahme des Aachener Oberbürgermeisters

01.10.10 Andrey Mashkin erhält den EEIM John Neal Award für die Arbeit „Analysis on the Electrical Properties of Syntactic Foam Under Various DC Field Stresses“

01.10.10

Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses zum AiF-Vorhaben „Reduzierung der

Druckbeanspruchung elektrischer Anlagen im Störlichtbogenfall“ in Aachen
Teilnehmer: Gerhard Pietsch, Daniel Eichhoff

04.10.10

Erster Arbeitstag von Lars Schröder, Elektroniklabor

18.10.10

Armin Schnettler unterzeichnet einen Zusammenarbeitsvertrag „Clarification of properties of controlling pressure rise due to fault arcs“ mit dem Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI), Japan

25.10. - 28.10.10

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

Teilnehmer: Gerhard Pietsch

01.11.10

Aussprache des Deutschen Arbeitskreises CIGRE A3 in Aachen

Teilnehmer: Armin Schnettler, Gerhard Pietsch

02.11.10

Erster Arbeitstag von Gregor Nicolic

04.11.10

Doktorprüfung von Michael Roscher

Referent: Dirk Uwe Sauer, Korreferent: Armin Schnettler

08.11.10

Erster Arbeitstag von Hendrik Natemeyer

08.11. - 09.11.10

VDE Kongress in Leipzig 2010

Teilnehmer: Armin Schnettler, Stefan Federlein, Sepideh Doroudian, Thomas Helmschrott, Christian Hille, Stefan Krengel, Thomas Pollok, Eva Szczechowicz

09.11.10

Verleihung des SAG Awards (2. Platz) an Stanislav Votruba im Rahmen des eStudent Days auf dem VDE Kongress in Leipzig

10.11.10

Verleihung des Preises der Otto-Junker-Stiftung an Philipp Masmeier für die Diplomarbeit zum Thema „Theoretische und experimentelle Untersuchung von Lichtbogenform und Schaltverhalten in Leistungsschalter-Modellanordnungen mit alternativen Düsengeometrien“ / „Theoretical and experimental investigation of the switching behaviour and the form of the electric arc in circuit breaker model arrangements with alternative nozzle geometries“

12.11.10

Anja Strauchs erhält den IEEE DEIS Graduate Award 2010 für herausragende PhD Arbeiten im Bereich Elektrische Isoliertechnik, Dielektrika und Hochspannungstechnik

13.11.10

„34. Hochwissenschaftliches Kolloquium“ am IFHT mit Verleihung des Preises „Mann mit der ruhigen Kugel“ an Thomas Dederichs

22.11.10

Erster Arbeitstag von Markus Götde

14.12. - 17.12.10

DAAD-Auswahlgespräche mit Bewerbern für Studienstipendien (Masterprogramm) in Skopje/Mazedonien

Teilnehmer: Gerhard Pietsch

17.12.10

Doktorprüfung von Torsten Wirz zum Thema „Verfahren zur Optimierung der Ultraschalldiagnostik an polymeren Isoliersystemen“

Referent: Armin Schnettler, Korreferent: Ernst Gockenbach

30.11.10

Letzter Arbeitstag von Leo Künzer, Elektroniklabor

31.12.10

Letzter Arbeitstag von Michael Kippen

Veröffentlichungen

Kittipong Anantavanich, Gerhard Pietsch, Daniel Eichhoff

Importance of SF₆-air gas data for pressure calculation due to fault arcs in electrical installations

Proc. XVIIIth Int. Conf. on Gas Discharges and Their Appl., Greifswald, 2010 Germany, pp. 122-125

Kittipong Anantavanich

Calculation of Pressure Rise in Electrical Installations due to Internal Arcs Considering SF₆-Air Mixtures and Arc Energy Absorbers

RWTH Aachen University, Dissertation 2010, Aachener Beiträge zur Hochspannungstechnik - Band 14, Verlagshaus Mainz, ISBN 3-86130-677-8

Tobias Blank, Stephan Thomas, Christoph Roggendorf, Thomas Pollok, Ionut Trintis, Dirk Uwe Sauer

Design and construction of a test bench to characterize efficiency and reliability of high voltage battery energy storage systems
32nd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), Orlando, FL, USA, 6-10 June 2010

Tirinya Cheumchit, Armin Schnettler, Thanapong Suwanasri

Derivation of Aging Characteristics for Power Transformers by Artificial Intelligence Techniques

Conference Proceedings of CMD 2010

Stefan Federlein, Bartosz Rusek

Praxisnahe Modellbildung zur Bewertung des Störungsaufkommens von Hochspannungs-Schaltgeräten

FGH-Fachtagung, Heidelberg, September 2010

Stefan Federlein, Claas Matrose

SmartWheels - Intelligente Elektromobilität in der Modellregion Aachen

RWTH Themen, Elektromobilität made in Aachen, Ausgabe 02/2010, ISSN-Nr. 0179-079X

Stefan Federlein

Modellierung des typspezifischen Störungsaufkommens von Hochspannungs-Schaltgeräten

RWTH Aachen University, Dissertation 2010, Aachener Beiträge zur Hochspannungstechnik - Band 15, Verlagshaus Mainz, ISBN 3-86130-678-6

Thomas Helmschrott, Devid Perissinotto, Martin Scheufen, Armin Schnettler

Integriertes Verkehrs- und Energieflussmodell / Integrated Modeling of Traffic and Power Flows

VDE-Kongress 2010, Leipzig, November 2010

Thomas Helmschrott, Devid Perissinotto, Martin Scheufen, Armin Schnettler

Integriertes Verkehrs- und Energieflussmodell

Internationaler ETG-Kongress, Leipzig, November 2010

Mikimasa Iwata, S. Tanaka, T. Ohtaka, T. Miyagi, T. Amakawa, Kittipong Anantavanich, Gerhard Pietsch

CFD Calculation of Pressure Rise and Propagation Depending on Arc Energy in a Closed Container

Proc. XVIIIth Int. Conf. on Gas Discharges and Their Appl. 2010, Greifswald, Germany, pp. 146-149

Mikimasa Iwata, Kittipong Anantavanich, Gerhard Pietsch

Influence of Current and Electrode Material on Fraction k_p of Electric Arc Energy Leading to Pressure Rise in a Closed Container During Internal Arcing
IEEE Trans. Power Del., Vol. 25, No. 3, 2010, p. 2028 - 2029

Mikimasa Iwata, S. Tanaka, T. Othaka, T. Amakawa, Kittipong Anantavanich, Gerhard Pietsch
Influence of electric arc energy on pressure rise and propagation due to high current fault arc in a closed container
Records of the 2010 Annual Meeting I.E.E. Japan, paper 6-206, 2010, p. 350

Christoph Kahlen, Holger Krings, Peter Wittlinger, Bernhard Schowe-von der Brellie, Stefan Federlein, Claas Matrose, R. Frings, Thomas Smolka
Einflüsse und Auswirkungen von Elektromobilität auf das Energieversorgungsnetz sowie Anforderungen und Voraussetzungen für eine interoperable Netzintegration
Internationaler ETG-Kongress, Leipzig, November 2010

Michael Kessler, Armin Schnettler
Investigation of the DC Breakdown Mechanism in Elastic Syntactic Foams
IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 17, Issue 3, pp. 898-905, IEEE, Juni 2010

Michael Kessler, Christoph Roggendorf, Armin Schnettler
Behavior of Elastic Syntactic Foams under Impulse Voltage Stress
Conference Record of the 2010 IEEE, International Symposium on Electrical Insulation (ISEI), 4 Seiten, San Diego (USA) 6.-9. Juni 2010

Michael Keßler
Einsatz von elastischen syntaktischen Schäumen in der Hochspannungstechnik
RWTH Aachen University, Dissertati-

on 2010, Aachener Beiträge zur Hochspannungstechnik - Band 16, Verlagshaus Mainz, ISBN 3-86130-679-4

Stefan Krengel, Thomas Dederichs, Thomas Smolka, Armin Schnettler
Scenario Analysis about Ecological and Economical Benefits of Dispersed Generation in Future Energy Networks
Third International Conference on Eco-Efficiency, Egmond aan Zee, Juni 2010

Stefan Krengel, Armin Schnettler, Thomas Dederichs, M. Bertling, J. Biermann, T. Gervens, M. Fiedeldey, E.-P. Meyer
Das Virtual Power System Allgäu - der Pilotbetrieb
VDE-Kongress 2010, Leipzig, November 2010

Andreas Kurz, Martin Seeger, Daniel Eichhoff, Armin Schnettler
Determination of the dielectric recovery inside insulating nozzles concerning gas flow
Proc. XVIII International Conference on Gas Discharges and Their Applications, Greifswald 2010, pp. 58-61

Andreas Kurz, Christof Kahlen, Ming Chark Tang, Matthias Hoffacker, Armin Schnettler
Investigation of New Nozzle Geometries and their Influence on the Interruption Behaviour for Gas Circuit Breaker
Proc. XVIII GD 2010, International Conference on Gas Discharges and Their Applications, Greifswald, Germany 2010, pp. 166-169

Andrey Mashkin
Analysis on the Electrical Properties of Syntactic Foam Under Various DC Field Stresses
European Electrical Insulation Manufacturers John Neil Award 2010

Andrey Mashkin, Anja Strauchs, Armin Schnettler, Bernd Freiheit-Jensen, Arne Lunding

Einfluss der inneren Feldstärkeverteilung auf die elektrische Durchschlagfestigkeit von syntaktischem Schaum / The Impact of the Internal Field Distribution on the Breakdown Strength of Syntactic Foam

ETG-Fachtagung: Isoliersysteme bei Gleich- und Mischfeldbeanspruchung; 27.-28.9.2010; Köln

Andrey Mashkin, Anja Strauchs, Armin Schnettler, Arne Lunding

The Impact of Different Alkali Ion Concentrated Hollow Glass Microspheres on the Electrical Breakdown Mechanism of Syntactic Foam

10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD); July 4th -9th, 2010; Potsdam, Germany

Andrey Mashkin, Anja Strauchs, Armin Schnettler, Jörn Podlazly, Karl-Mika Reiß

Investigation on Inverse Volume Effect of Syntactic Foam under Uniform dc Field Stress

IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI) 2010; 6.-9.Juni 2010; San Diego, USA

Claus Neumann, Bartosz Rusek, Christian Schorn, Stefan Federlein, Armin Schnettler, Gerd Balzer, Thomas Krontiris

Modelling the effect of maintenance on failure occurrence and lifetime management of high voltage circuit breakers

CIGRE Session, A3-203, Paris (France) 2010

Thomas Pollok, Eva Szczechowicz, Claas Matrose, Georg Stöckl, Georg Kerber, Martin Lödl, Armin Schnettler, Rolf Witzmann, Petra Behrens

Flottenversuch Elektromobilität - Netzma-

nagementstrategien mittels elektrifizierter Fahrzeugflotten

VDE-Kongress 2010, Leipzig, November 2010

Ralf Puffer

Netzoptimierung durch witterungsabhängigen Freileitungsbetrieb und Hochtemperaturleiter

Deutsche Umwelthilfe (DUH) Netzkongress 2010, Erneuerbare ins Netz, Berlin 2010

Ralf Puffer

Möglichkeiten zur Erhöhung der Strombelastbarkeit von Freileitungen am Beispiel von Freileitungs-Monitoring und Hochtemperaturleitern

6. ETP-Konferenz Instandhaltung von Freileitungen und Freileitungsmasten, 2010, Frankfurt

E. Rijks, G. Sanchis, G. Balzer, Stefan Federlein, G. Ford, A. Gaul, T. Jesson, K. Sand, B. Sander, S. Voronca et al.

Transmission Asset Risk Management

Cigré Working Group C1.16, TB 422, Paris 2010

E. Rijks, G. Sanchis, G. Balzer, Stefan Federlein, G. Ford, A. Gaul, T. Jesson, K. Sand, B. Sander, S. Voronca, et al.

Transmission Asset Risk Management

Cigré Working Group C1.16, TB 424, Paris 2010

Christoph Roggendorf, Michael Kessler, Sascha Schulte, Armin Schnettler

Accelerated Test Procedures for Hydrothermal Aging

Conference Record of the 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI), 5 Seiten; San Diego (USA) 6.-9. Juni 2010

Martin Scheufen, Ralf Puffer, Bartosz Rusek

Analyse der Strombelastbarkeit von Freileitungen mit Freileitungs-Monitoring bei kleinen Windgeschwindigkeiten
GIS-Anwenderforum 2010, Darmstadt

Michael Schmale, Hans-Joachim Dräger, Ralf Puffer

Implementation and Operation of a Cable Monitoring System in Order to Increase the Ampacity of a 220-kV Underground Power Cable

CIGRE Session, B1-113, Paris (France) 2010

Michael Schmale, Ralf Puffer, Hans-Joachim Dräger

Optimierung der Strombelastbarkeit eines 220-kV Kabels / Ampacity Improvement of a 220-kV Underground Cable

E.ON, Bayreuth 2010

Michael Schmale, Hans-Joachim Dräger, Ralf Puffer, Reinhold Kliegel

Freileitungs-Monitoring - Entwicklung und Einführung eines Systems zur witterungsabhängigen Erhöhung der Strombelastbarkeit von Freileitungen / Development and Implementation of a Monitoring System for Weather Based Dynamic Rating of Overhead Lines

E.ON, Bayreuth 2010-09-08

Michael Schmale, Ralf Puffer

Freileitungs-Monitoring im 380-kV-Netz - Freileitungen sicher betreiben und Reserven nutzen

Netzpraxis, Jg.49 (2010), Heft 11

Anja Strauchs, Andrey Mashkin, Armin Schnettler, Alexander Tröger, Bernd Wandler

Einfluss von Temperatur und elektrischer Feldstärke auf die elektrische Leitfähigkeit und Spannungsfestigkeit von syntaktischem Schaum

ETG Fachtagung, Isoliersysteme bei

Gleich- und Mischfeldbeanspruchung; 27.-28.9.2010; Köln

Anja Strauchs, Andrey Mashkin, Armin Schnettler, Jörn Podlazly

The Impact of Water Absorption on the Dielectric Properties of Syntactic Foam

10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD); July 4th -9th, 2010; Potsdam, Germany

Anja Strauchs, Andrey Mashkin, Armin Schnettler, Jörn Podlazly, Bernd Wandler

The Impact of Electrical Field Stress on the Volume Conductivity of Syntactic Foam

IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI) 2010; 6.-9.Juni 2010; San Diego, USA

Anja Strauchs, Andrey Mashkin, Armin Schnettler, Jörn Podlazly, Bernd Freiheit-Jensen

Investigations on the Partial Discharge Behavior of Syntactic Foam under Uniform Field Stress

IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI) 2010; San Diego, USA 6.-9.Juni 2010

Ming-Chark Tang

Widerstandsverteilung in Schaltlichtbögen von Selbstblasleistungsschaltern während der Stromnulldurchgangsphase

RWTH Aachen University, Dissertation 2010, Aachener Beiträge zur Hochspannungstechnik - Band 13, Verlagshaus Mainz, ISBN 3-86130-676-X

M. Wietschel (Herausgeber), M. Arens, C. Dötsch, S. Herkel, W. Krewitt, P. Merkwitz, D. Möst, Martin Scheufen

Energietechnologien 2050 - Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung

Fraunhofer Verlag 2010 (ISSN: 1612-7455); ISBN: 978-3-8396-0102-0



POSTER SESSIONS

**Tirinya Cheumchit, Armin Schnettler,
Thanapong Suwanasri**

*Derivation of Aging Characteristics for
Power Transformers by Artificial Intelli-*

gence Techniques

CMD-Konferenz, Tokyo (Japan) 2010

Institutsexkursion nach Australien

03.-18.09.2010

In regelmäßigen Abständen von 3-4 Jahren findet am IFHT eine Exkursion mit Professoren und Assistenten statt. So ging die Exkursion in diesem Jahr nach Down Under. Nach einer Flugzeit von ca. 24 h, wurden binnen 12 Tagen vier Stationen an der Ostküste angesteuert. Die Reise führte von Frankfurt über Singapur als Zwischenstopp zu den Metropolen wie Melbourne, Sydney und Brisbane aber auch in das tropische Cairns. Während dessen wurden zahlreiche Firmen, Universitäten und Sehenswürdigkeiten besucht sowie Kontakte nach Australien vertieft.

Melbourne 05.-08.09.2010

Die erste Station führte in das südöstlich gelegene Melbourne, welches am ersten Tag seine Vielfältigkeit der australischen Lebensweise in einem Sightseeing offenbarte. Der erste Ganztagesausflug fand dann am nächsten Morgen (Montag) statt und führte zunächst nach Traralgon in das Kraftwerk Loy Yang sowie den anliegenden Braunkohletagebau. In diesem Zusammenhang interessant zu erfahren war, dass Australien mehr als genug installierte Kraftwerksleistung und Rohstoffe wie Stein- und Braunkohle zur Verfügung hat, allerdings die Wasserknappheit des Landes eine ganz entscheidende Größe im Kraftwerksmanagement darstellt. Darüber hinaus bildet das derzeitige Bevölkerungswachstum eine wesentliche Herausforderung beim Betrieb sowie Neubau von Assets.

Vom Kraftwerk ging es ein paar Kilometer weiter zur Basslink Konverterstation. Der Basslink Interconnector verbindet über eine HVDC Leitung Südaustralien mit Tasmanien. Hierbei kommen auf einer Strecke von 295 km Seekabel zum Einsatz, die bei einer Spannung von ca. 400 kV dauerhaft eine Leistung von 500 MW übertragen können. Olex, der größte Kabel-

hersteller Australiens gab am dritten Tag einen umfassenden Einblick in die Kabelproduktion, bevor am Mittwoch auch schon der erste Inlandsflug nach Sydney anstand.



Abb. 1: Teilnehmer der Australienexkursion am Tagebau in Traralgon

Sydney 08.-10.09.2010

Zunächst wurde nach Ankunft das größte Aquarium der südlichen Hemisphäre im Rahmen einer Stadttour besucht, welches unter anderem die typischen australischen Meeresbewohner beheimatet. Das Highlight der Stadttour war sicherlich das Opernhaus, das 2007 zum UNESCO Welterbe ernannt wurde. Am Donnerstagvormittag gab AEMO (Australian Energy Market Operator) einen Einblick in den Aufbau des australischen Energiemarktes sowie die derzeitigen wesentlichen Herausforderungen in der Planung und Betrieb von Assets

- primär getrieben durch einen rasanten Bevölkerungszuwachs. Am Nachmittag wurde die von Transgrid (australischer Transportnetzbetreiber) im Herzen Sydneys betriebene 330 kV GIS Haymarket Substation besucht, die mit einer Übertragungsleistung von 1200 MVA eine der größten der Welt und damit eine sehr imposante, wenngleich nach außen unscheinbare Umspannanlage darstellt. Am 10.09. ging es schliesslich zu AGL (Australian Gas Light Company) dem größten australischen Strom und Gasanbieter mit dem gleichzeitig höchsten Anteil erneuerbarer Energien. Beleuchtet wurde unter anderem die Attraktivität der Teilnahme am australischen Energiemarkt durch ein differenziertes Angebot von Produkten. Schließlich ging es übers Wochenende vom subtropischen Sydney ins tropische Cairns im Norden Australiens.



Abb. 2: Blick auf Opernhaus und Harbour Bridge in Sydney

Cairns 10.-13.09.2010

Das abwechslungsreiche Wochenendprogramm unter tropischen Bedingungen bot eine beeindruckende Kulisse des australischen Regenwaldes, welche durch das Whitewater Rafting auf dem Barron River ergänzt wurde.

Zweifelsfrei den Höhepunkt des Wochenendes bildete ein Tagesausflug ans Great Barrier Reef von Port Douglas aus. An drei verschiedenen Stellen konnten beim Schnorcheln fantastische Korallenformatio-

nen, farbenfrohe Fische und sogar Riffhaie beobachtet werden.

Zum Abschluss führte eine Halbtagestour in den australischen „Dschungel“. Eine 7,5 km lange Seilbahn durch den Urwald ließ einen tollen Blick über die Baumgipfel und den Barron Gorge Wasserfällen zu.



Abb. 3: Whitewater Rafting am Barron River

Brisbane 13.-17.09.2010

Zu Beginn der zweiten Woche ging der letzte Inlandsflug in den Osten Australiens, genauer nach Brisbane. Hier wurden zunächst am Dienstag die beiden Campusuniversitäten Queensland University of Technology und University of Queensland besucht. In gemischten Workshops fand ein angeregter wissenschaftlicher Austausch statt, bei dem auch neue Kontakte geknüpft werden konnten.

Am Mittwoch stand der letzte Ganztagesausflug auf dem Programm. Zusammen mit der Firma Powerlink wurde eine Umspannstation, ausgestattet mit Hybrid-GIS Anlagentechnik, sowie die Wivenhoe Powerstaion besucht. Letzteres ist ein Pumpspeicherkraftwerk mit zwei 250 MW Turbinen, betrieben von Tarong Energy. Der Wivenhoe Dam erzeugt den künstlich angelegten Lake Wivenhoe, der gleichzeitig auch als Trinkwasserspeicher für den Großraum Brisbane dient. Abgerundet wurde der Tagesausflug durch den Besuch des Lone Pine Koala Sanctuary, in dem u.a. zahlreiche Koalas bewundert

und Kängurus gefüttert werden konnten.



Abb. 4: Koala im Lone Pine Koala Sanctuary in Brisbane

AEMO mit Hauptsitz in Brisbane war die letzte Firma, die während der Australienexkursion besucht wurde. Thema war auch hier eine ausführliche Vorstellung des Aufbaus und der Herausforderungen des australischen Energiemarktes. Der große Unterschied des australischen Netzes gegenüber der europäischen Netze besteht in seiner enormen Längenausdehnung bei gleichzeitig extrem geringer Vermaschung, da sich die Einwohner Australiens fast vollständig entlang der Ostküste des Landes angesiedelt haben und das Landesinnere weitestgehend unbesiedelt ist. Im Anschluss konnten im Queensland Museum z. B. Tiere wie verschiedene Spinnen und Schlangen bewun-

dert werden, für die Australien ebenfalls berücksichtigt ist.



Abb. 5: Fahrt auf dem Brisbane River

Mit vielen neuen Eindrücken verließen wir schließlich am Freitag das interessante wie beeindruckende Land Australien mit einigen neuen Erfahrungen an Bord.

Koordinatoren der Exkursion und Autoren:

Dr.-Ing. Michael Keßler
kessler@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94912

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

Pfingst-Exkursion nach Hamburg

Um den Studenten der RWTH nicht nur die Reize der südlichen Nachbarländer Deutschlands näher zu bringen, war das Ziel der diesjährigen Exkursion Norddeutschland. Vom Pfingstmontag, dem 24.5.2010 bis zum 28.5.2010, war Hamburg die vorübergehende Heimat für die Teilnehmer der Exkursion, die wie jedes Jahr aus Assistenten des Lehrstuhls, Studenten und natürlich Prof. Schnettler bestand. Während dieser Woche ermöglichten zahlreiche Unternehmen wie etwa Airbus, RePower und Nexans den Studenten interessante Einblicke in ihr Tätigkeitsfeld, wobei die Themenspannbreite von der Elektronik in einem Flugzeug bis zu den Hochöfen eines Stahlwerkes reichte.

Anreise nach Hamburg

Um 9 Uhr am Pfingstmontag startet die Exkursion in Richtung Hamburg. Trotz dieser späten Abfahrt verlief die Busfahrt recht ruhig, da die meisten Teilnehmer bald wieder in tiefen Schlaf verfielen. Nach einer erholsamen Mittagspause wurde lebendig die Planung für den freien Abend in Hamburg sowie die Zimmereinteilung diskutiert. Gegen 17 Uhr haben wir unser Ziel, das zentral gelegene A&O-Hostel in der Hamburger Innenstadt, bezogen.

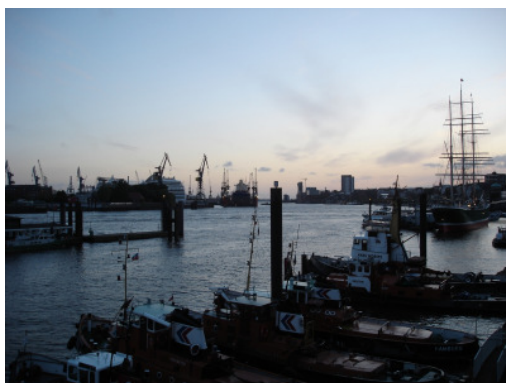


Abb. 1: Blick auf den Hamburger Hafen

Zum Ausgleich zu der langen Busfahrt stand nach dem Einchecken der traditionelle Pfingstmontagslauf mit Prof. Schnettler auf dem Programm. Die Außenalster bot sich als ideale Laufstrecke an, auf der gilt: Sehen und gesehen werden.

Arcelor Mittal - Stahlwerk

Am Dienstag führt uns die Exkursion zu unserer ersten Station in Hamburg, dem Stahlwerk der Firma Arcelor Mittal.

Nachdem Vorträge gehalten sowie einen Film über die Firma und die Funktionsweise des Stahlwerks präsentiert wurde, startete die Werksführung. In mehreren Gruppen wurde uns das Werk vorgestellt, angefangen bei dem Eisenerz, über die Besichtigung der Hochöfen bis hin zur Fertigung der einzelnen Produkte wie etwa Stahlträger (Abb. 2).

Besonders beeindruckend war der extrem heiße und laute Hochofen, in denen das Eisenerz eingeschmolzen wird, sowie der Hochofenabstich, bei dem das flüssige Material aus dem Hochofen zur Weiterverarbeitung abgelassen wird.



Abb. 2: Stahlwerk der ArcelorMittal

E.ON Netz - 110kV-Umspannwerk

Zur Erholung nach der aufregenden Besichtigung im Stahlwerk fuhren wir am Nachmittag hinaus ins Grüne. Dort besichtigten wir ein 110kV-Umspannwerkes der E.ON Netz GmbH, welches in Norderstedt nördlich von Hamburg liegt. Bei Kaffee und Kuchen in einem Restaurant wurde uns vorgestellt, wie der Bau eines Umspannwerkes durchgeführt wird und welche Möglichkeiten Studenten bei dieser Projektarbeit haben. Anschließend fuhren wir hinaus zum Umspannwerk, wo wir uns die Anlagen sowie die Steuerungs- und Einstellungsmöglichkeiten anschauten (Abb. 3).



Abb. 3: Gruppenbild am Umspannwerk

Gegen 17 Uhr ging die Fahrt zurück nach Hamburg, wo wir zum ersten Mal Bekanntschaft mit dem Hamburger Feierabendverkehr machten. Der Abend stand den Studenten zur freien Verfügung und wurde genutzt, um die Hamburger Innenstadt sowie die Reeperbahn besser kennenzulernen.

Airbus - Cabin Systems Test Center und Werksrundfahrt

Den dritten Tag der Exkursion starteten wir sehr früh am Morgen. Unser erster Halt war bei AIRBUS Operations GmbH in Buxtehude, wo sich die Teile der Entwicklung befinden. Das CSC (Cabin Systems Test Center) und die Testrigs für die Kabinenelektronik veranschaulichten, wie komplex die Technologie im Flugzeug ist und dass alles

noch auf Analogtechnik beruht. Ein Spaziergang durch den A380 war zumindest in Teilen möglich.



Abb. 4: Vorträge bei Airbus

Nach dieser sehr technischen Einführung in die Thematik, besuchten wir anschließend die Flugzeugfertigung von Airbus in Kreetzlag, wo sich die Endlinienmontage der A320-Familie und die Struktur- und Ausrüstungsmontage des A380 befinden (Abb. 5). Die unterschiedlichen Größendimensionen der Flugzeugfamilien waren beeindruckend, ebenso wie die hohen Qualitätsanforderungen selbst an kleinsten Flugzeugteilen, die zweifach kontrolliert werden.



Abb. 5: Exkursionsteilnehmer vor dem A380

Vattenfall - Kraftwerk Moorburg

Nach den spannenden Einblicken in den Flugzeugbau, wendeten wir uns wieder der klassischen Energietechnik zu und besichtigten den Neubau des Kraftwerks Moorburg (Abb. 6).

Nach einer Einführung über die Tücken beim Neubau eines Kraftwerks, welche u.a. den Bau einer Fischtreppe umfassten, er-

hielten wir baustellentaugliche Kleidung und starteten einen sehr informativen und vor allem sonnigen Rundgang über das Gelände.



Abb. 6: Baustelle des Kraftwerks Moorburg

Nach einer abschließenden Fragerunde, ging es um 16:30 zurück in die Innenstadt, um die Stadt und den Hafen zu erkunden.

RePower - TechCenter und Produktionsführung

Trotz nächtlicher Aktivitäten waren auch am vierten Tag alle Teilnehmer pünktlich zur Abfahrt bereit. Unser nächstes Ziel war das Repower TechCenter in Osterrönfeld, wo wir eine Unternehmenspräsentation sowie Fachvorträge zur Windenergie hörten. Nach einer kleinen Erfrischung ging es dann weiter zur Produktion von Repower in Husum. In dem Werk wird das Produkt Maschinenhaus und Nabe der Windenergieanlagen gefertigt. Den Teilnehmern wurde es ermöglicht, in ein fertiges Maschinenhaus

hineinzuklettern, um eine Vorstellung von den engen Platzverhältnissen zu bekommen. Nach der Rückkehr nach Hamburg stand das traditionelle Abschlussessen mit Prof. Schnettler an, welches in einem kleinen Restaurant direkt an der Elbe stattfand.

Nexans und Rückfahrt nach Aachen

Der letzte Tag der Exkursion startete mit dem Auschecken aus dem Hostel und mit der Fahrt von Hamburg nach Hannover zu unserer letzten Station bei Nexans, einem der größten Kabelhersteller. Nach einem sehr interessanten Fachvortrag von Dr. Meurer über die Energiekabeltechnologie wurden die spannendsten Energiekabelprojekte von Nexans vorgestellt. Nach einer mittäglichen Stärkung startete der Fabrikrundgang, währenddessen man das zuvor Gelernte im Produktionsprozess wiederfinden konnte. In der abschließenden Fragerunde konnten die Studenten ihre offenen Fragen klären.

Gegen 16 Uhr ging es wieder ruhig zurück nach Aachen, wo die Teilnehmer erschöpft aber zufrieden ankamen.

Organisation

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



Abb. 7: Gruppenbild bei RePower

Betriebsausflug ins Ahrtal

Unser diesjähriger Betriebsausflug führte uns in Ahrtal, wo wir den ehemaligen Schutzbunker der Bundesregierung besichtigt haben. Anschließend konnten wir in der Winzergenossenschaft Mayschoss alle Stationen der Weinherstellung kennenlernen, bevor wir den vor Ort produzierten Wein probiert haben. Traditionell wurde der Tag bei einem gemütlichen Grillen bei Familie Schnettler abgerundet.

Führung durch die Dokumentationsstätte Regierungsbunker

Pünktlich um 8 Uhr morgens sind wir am 18.08.2010 bei leichtem Nieselregen mit dem Reisebus in Aachen gestartet. Mit dabei waren 36 Hochspanner, die sich auf einen interessanten Tag im etwa eine Stunde entfernten Ahrtal gefreut haben.

Die erste Station führte uns zurück in die Zeit des Kalten Krieges. In Bad-Neuenahr Ahrweiler entstand in den 1960er Jahren in alten Eisenbahntunneln ein Bunkerbauwerk, das bis zu 3000 Menschen im Falle eines Atomkriegs über Deutschland Schutz für 30 Tage geboten hätte.



Abb. 1: Vor dem Regierungsbunker

Mit der Unterbringungsmöglichkeit für wichtige Vertreter der Regierung sollte im Ernstfall sicher gestellt werden, dass wichtige Aufgaben der öffentlichen Hand weiterhin erledigt werden konnten. Das über 15 km lange Tunnelsystem des sogenannten „Ausweichsitzes der Verfassungsorgane des Bundes im Krisen- und Verteidigungsfall zur Wahrung von deren Funktionstüchtigkeit“ wurde mit Ende des Kalten Krie-

ges überflüssig und ab 1997 zurückgebaut. Ein Teil der Anlage wurde erhalten und bildet heute die Dokumentationsstätte Regierungsbunker. Aufgeteilt in zwei Gruppen wurden wir durch den 12°C warmen Bunker geführt und konnten mit den vielen erhaltenen Einrichtungsgegenständen und Sicherungsanlagen einen Eindruck über die Verhältnisse im Bunker erhalten.



Abb. 2: Schutztüre im Bunker

Winzergenossenschaft Mayschoss

Aufgrund des anhaltenden Regens haben wir unseren Abstecher über den Rotweinwanderweg kurzerhand gestrichen und sind direkt zur Winzergenossenschaft Mayschoss gefahren. Dort wurden wir zunächst durch die Produktionsanlagen geführt. Von der Anlieferung der Trauben, die im Ahrtal aufgrund der steilen Hänge und kleinen Parzellen besonders zeitintensiv gelesen werden, über die Pressen, Gär- und Lagertanks bis hin zur Abfüll- und Etikettiermaschine haben wir alle Stationen der Weinherstellung begutachten können. Von besonderem Interesse war die Möglichkeit, Flaschen

mit selbst gestalteten Etiketten für Jubiläen, Hochzeiten und Geburtstage direkt in der Winzergenossenschaft anfertigen zu lassen.



Abb. 3: Abfüllanlage

Durch das historische Kellergewölbe, in dem auch noch gute Tropfen aus den 1950er Jahren lagern, wurden wir in einen gemütlichen Veranstaltungsraum zur Weinprobe geführt. Gestärkt durch einen Winzerteller konnten wir insgesamt sechs Weine der Winzergenossenschaft vom trockenen Weißwein über Blanc de Noir bis hin zum lieblichen Rotwein verkostigen. Unser Führer hatte nicht nur zu jedem Wein die passende Erläuterung zu Herstellungsverfahren und Besonderheiten des jeweiligen Weins, sondern auch den Hinweis, dass es genau zwei Sorten Wein gibt: den der schmeckt, und den der nicht schmeckt.



Abb. 4: Weinprobe

Ausklang bei Familie Schnettler

Der Ausklang des Tages in Form eines gemeinsamen Grillens bei Familie Schnettler im Garten gehört inzwischen fest zum Programm des Betriebsausflugs am IFHT. Von Regen blieben wir an diesem Abend verschont und so folgten die meisten Kollegen der Einladung. Zum Buffet hat jeder Mitarbeiter etwas beigetragen, so dass es zum Grillfleisch eine große Auswahl an Beilagen, Salaten und Desserts gab. Die Feuerstelle im Garten spendete an diesem ungewöhnlich kühlen Augustabend angenehme Wärme, so dass wir den Tag gemütlich abschließen konnten.



Abb. 5: Ausklang bei Familie Schnettler

Organisation

Dipl.-Ing. Stefan Kregel
kregel@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-93034

Dienstleistungsportfolio des IFHT

Das Institut für Hochspannungstechnik verfügt über Erfahrungen in verschiedenen Bereichen der Hochspannungsmess- und prüftechnik sowie über eine umfangreiche Ausstattung zur Durchführung dieser Untersuchungen. Daher können verschiedene Prüfdienstleistungen und Untersuchungen angeboten werden.

Dienstleistungen

Ein Schwerpunkt der angebotenen Untersuchungen liegt in der Bestimmung von elektrischen und dielektrischen Materialkennwerten. Im Bereich elektrischer Kennwerte sind vor allem die Durchschlagfestigkeit und der Oberflächen- bzw. Durchgangswiderstand zu nennen, bei dielektrischen Kennwerten liegt ein Schwerpunkt auf der Bestimmung der Dielektrizitätszahl ϵ_r und des Verlustfaktors $\tan \delta$ von Materialproben. Weiterhin sind Teilentladungsmessungen sowie Prüfungen der Spannungsfestigkeit möglich. Die Prüfungen werden gemäß der zutreffenden Normen durchgeführt. Bei Bedarf können kundenspezifische Prüfverfahren entwickelt werden, beispielsweise Untersuchungen bei veränderten Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit). Neben experimentellen Untersuchungen stehen verschiedene Simulationstools zur Verfügung. Dabei liegt neben der Berechnung elektrischer und magnetischer Felder ein Schwerpunkt auf CFD-Simulationen zur Berechnung von elektrischen und thermodynamischen Vorgängen beispielsweise in Leistungsschaltern. Bei umfangreichen Fragestellungen bietet sich eine Kooperation im Rahmen von F&E-Projekten an.

Einrichtungen

Neben den klassischen hochspannungstechnischen Laboren stehen mehrere spezialisierte Labore und Prüfkreise zur Verfügung:

- Hochspannungshalle für Prüfungen bis 400 kV AC bzw. 800 kV Stoßspannung

- Hochspannungsbaukästen für den modularen Aufbau von Versuchsanordnungen
- Synthetische Prüfkreise zur Bestimmung des Ausschaltvermögens von Leistungsschaltermodellen mit verschiedenen Isoliergasen
- Teilentladungsmessstände mit Prüfspannungen bis 200 kV und Störpegel $< 0,3$ pC
- mehrere Klimakammern (15 m³, -40 °C bis 140 °C) und Öfen sowie ein Thermoschockschrank
- Prüfstände und Testkammern zur Untersuchung von Alterungsvorgängen (u.a. Salznebeltest)
- Labor zur Materialverarbeitung von Isolierstoffen

Zusammen mit der institutseigenen Werkstatt können so unterschiedlichste Versuchsaufbauten realisiert werden, die sich speziell an die Anforderungen der durchzuführenden Untersuchungen anpassen lassen.

Kontakt

Dr.-Ing. Ralf Puffer
puffer@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94950

Dipl.-Ing. Mathias Knaak
knaak@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94909

Prüf- und Qualifizierungszentrum für Batteriespeichersysteme und Smart Grids

Zukünftige Verteilungsnetze werden sich durch eine lange Koexistenz von dezentralen Erzeugungseinheiten, klassischen und modernen Verbrauchern sowie den steigenden Anteil von IK-Technologien auszeichnen. Speziell die Integration von zunehmend regenerativen Energiewandlungseinheiten sowie Speichertechnologien oder Elektrofahrzeugen ist in ihren physikalischen Auswirkungen nicht vollständig bekannt. So sind Untersuchungen zu Betriebsmittelaus- und Überlastungen, neue Schutzkonzepte oder auch mögliche Beiträge zu Systemdienstleistungen (Spannungshaltung, Frequenzregelung, etc.) durch Elektrofahrzeuge und andere Batteriespeicher bislang weitgehend unerforscht. Die Identifikation dieser neuen Problemstellungen setzt neben simulativen Untersuchungen auch messtechnische Analysen voraus, die durch den Aufbau eines Kompetenzzentrums für Batteriespeichersysteme und Smart Grids an der RWTH Aachen maßgeblich vorangetrieben werden.

Einleitung

Die verstärkte Integration regenerativer Energiequellen führt zwangsläufig zur Abkehr von hierarchischen Energieversorgungsstrukturen, hin zu hoch dynamischen Systemen. Die sichere Energieversorgung der Zukunft erfordert unter Berücksichtigung bidirektionaler Lastflüsse, dezentraler Erzeuger, starker Lastschwankungen wie auch der Integration von Elektrofahrzeugen eine intelligente Netzführung. Diese Systemarchitektur setzt eine verstärkte Kommunikation zwischen Erzeugern, Verbrauchern, Energiespeichern wie auch Netzkomponenten voraus, so dass durch fortlaufenden Informationsaustausch der Zustand des Gesamtsystems ausreichend genau abgebildet werden kann. Es gilt zu untersuchen, welche technischen Anforderungen an eine derartige Energieversorgungsstruktur gerichtet werden. So müssen Netzurückwirkungen und Schutzkonzepte, das Verhalten von Betriebsmitteln im Normal- und Fehlerfall und innovative Netzführungskonzepte unter Berücksichtigung steuerbarer Stromerzeugungsanlagen und Speicher tiefgehend analysiert werden. Zur messtechnischen Erprobung und Erforschung möglicher Lösungskon-

zepte entsteht aktuell an der RWTH Aachen ein einzigartiges Testzentrum zur Prüfung und Qualifizierung Batteriespeichersystemen und Smart-Grid-Technologien.



Abb. 1: Prüf- und Qualifizierungszentrum: Hüttenstraße 1-9, Aachen

Prüf- und Qualifizierungszentrum

Das Testzentrum wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert und in enger Kooperation zwischen dem Institut für Stromrichtertechnik und elektrische Antriebe (ISEA) und dem Institut für Hochspannungstechnik (IFHT) konzipiert und aufgebaut. Durch die Zusammenarbeit im Bereich der elektrischen Netztechnik und Batteriespeichertechnik werden zwei Themenbereiche verknüpft, die zur Identifikation und Bewertung zentraler Problemstellungen notwendig sind.

So soll neben den spezifischen Problemstellungen der Netz-, Speicher- und Stromerzeugungstechnologien insbesondere die Untersuchung von Schnittpunkten dieser Thematiken möglich sein. Dazu zählen unter anderem

- Wechselwirkungen zwischen Verteilungsnetzen und Energiespeicher- bzw. Stromerzeugungssystemen.
- Verhalten von Betriebsmitteln im Normal- und Fehlerfall.
- Potentialanalysen für Systemdienstleistungen auf Verteilnetzebene (z.B. zusätzliche Bereitstellung von Regelleistung durch Elektrofahrzeuge).
- Identifikation von Anforderungen an elektrische Speicher und Stromerzeugungssysteme durch die Bereitstellung von Netzdienstleistungen (z.B. Einfluss auf das Alterungsverhalten von Batteriespeichern).
- Erprobung neuer Lösungen für Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT-Lösungen) innerhalb intelligenter Verteilnetze.

Mit Hilfe dieser Untersuchungen sollen Beiträge zur Spezifizierung konkreter Anforderungen an IKT-Lösungen, Leistungselektronik, Netztechnik und Netzmanagementsysteme geleistet werden, die es ermöglichen, aus Systemsicht optimierte Betriebsstrategien abzuleiten. Dabei ist ebenso die Berücksichtigung übergeordneter Fragestellungen von zentraler Bedeutung. Dies sind beispielsweise:

- Wie funktionieren die Abrechnungssysteme innerhalb einer dezentralen Energieversorgungsstruktur?
- Wie kann sichergestellt werden, dass Elektrofahrzeuge trotz Systemdienstleistungen für die Nutzer zum richtigen Zeitpunkt aufgeladen sind?

- Wie können anreizorientierte Strompreismodelle für die Endverbraucher aussehen?
- Welche sicherheitstechnischen Anforderungen werden an die IKT-Systeme gestellt (Verhinderung von Missbrauch und Manipulation)?

Darüber hinaus soll das Testzentrum wesentliche Beiträge zur Standardisierung und Zertifizierung von Elektromobilitäts- und Smart Grid Technologien leisten. So sind normgerechte Untersuchungen zu Oberschwingungsströmen, Spannungsschwankungen und Störfestigkeitseigenschaften möglich. Die Eignung von Betriebsmitteln, Kommunikationstechnologien und Schutzkonzepten kann im normalen und fehlerhaften Betrieb von Verteilnetzen erprobt werden. Damit ist sowohl die Entwicklung als auch die Verifikation neuer Netzanschlussrichtlinien für Elektrofahrzeuge, neue IKT-Lösungen oder Netzmanagementsysteme möglich.

Abbildung 2 zeigt die Struktur am Standort Aachen. Für den Aufbau der Laboreinrichtungen bietet der Standort über 1200 m² Hallenfläche und mehr als 2000 m² Außenfläche. Im Außenbereich wird die Aufstellung von 22 Einzel- und 3 Doppelprüfcontainern erfolgen, deren technisches Equipment eine detaillierte Untersuchung unterschiedlicher Akkumulatorzellen- und packs unter diversen elektrischen und mechanischen Belastungsszenarien ermöglicht. Zur Verfügung stehen unter anderem elektrische Prüfkreise mit automatischen Lade- und Entladeeinheiten (PKW- und NKW Emulatoren), Temperatorkammern (-40°-130°C) sowie ein Impedanzspektrometer zur Vermessung elektrischer und dielektrischer Materialeigenschaften.

Die Analyse und Bewertung zukünftiger elektrischer Netze auf Mittel- und Nieder-

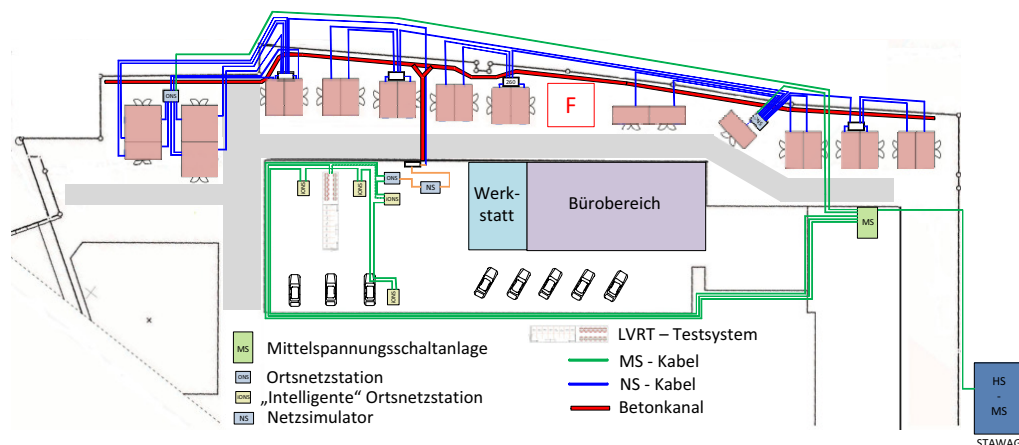


Abb. 2: Aufbau des Prüf- und Qualifizierungszentrums

spannungsebene erfolgt im Hallenbereich des Gebäudes.

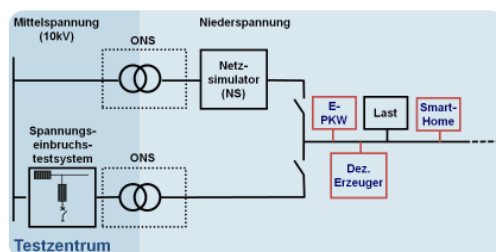


Abb. 3: Technisches Konzept des Prüf- und Qualifizierungszentrums

Abbildung 3 zeigt das Konzept dieses Versuchsnetzes. Mit Hilfe eines Netzsimulators ist die Erzeugung variabler Spannungsverläufe auf Niederspannungsebene bis zu einer Peakleistung $> 200 \text{ kVA/Phase}$ möglich. Die integrierte Messung von Oberschwingungen und Flicker ermöglicht gleichzeitig die Analyse des physikalischen Verhaltens von Prüflingen am Netz, wobei eine Vielzahl diverser Prüfverfahren vollautomatisch durchgeführt werden kann.

Dies sind unter anderem Prüfverfahren zur Untersuchung von

- Oberschwingungsströmen, die in das öffentliche Niederspannungsnetz eingepreßt werden (IEC 61000-3-2, 61000-4-13),
- Spannungsschwankungen und Flicker, die dem öffentlichen Nie-

derspannungsnetz eingepreßt werden (IEC 61000-3-3),

- Störfestigkeitsprüfungen elektrischer Betriebsmittel gegenüber Spannungseinbrüchen, Kurzzeitunterbrechungen und Spannungsschwankungen (IEC 61000-4-11).

Zukünftige Energieerzeugungsstrukturen verlangen eine verstärkte Kommunikation zwischen Netzkomponenten, Energiespeichern, Verbrauchern und Stromerzeugungsanlagen. Zur Erprobung derartiger Technologien auf Verteilnetzebene wird das Testzentrum über vier intelligente Ortsnetzstationen (iONS) verschiedener Hersteller und Leistungsklassen (400 kVA, 630 kVA, 1250 kVA) verfügen, die mit geeigneter Messtechnik und standardisierten Kommunikationsschnittstellen ausgestattet sind. Diese Technik erlaubt den Aufbau und die Untersuchung realer Mittel- und Niederspannungsstränge unter Einbindung unterschiedlicher IKT-Lösungen (Ethernet, PLC, GSM...) für Smart Grids. Analog zu realen Netzformen in dicht bebauten Gebieten, sind die Ortsnetzstationen im Testzentrum zu einem Ringnetz verschaltet (siehe Abbildung 4). Jede Transformatorstation ist niederspannungsseitig mit sechs Abgängen ausgestattet, die mit beliebigen Niederspannungssträngen beschaltet werden können.

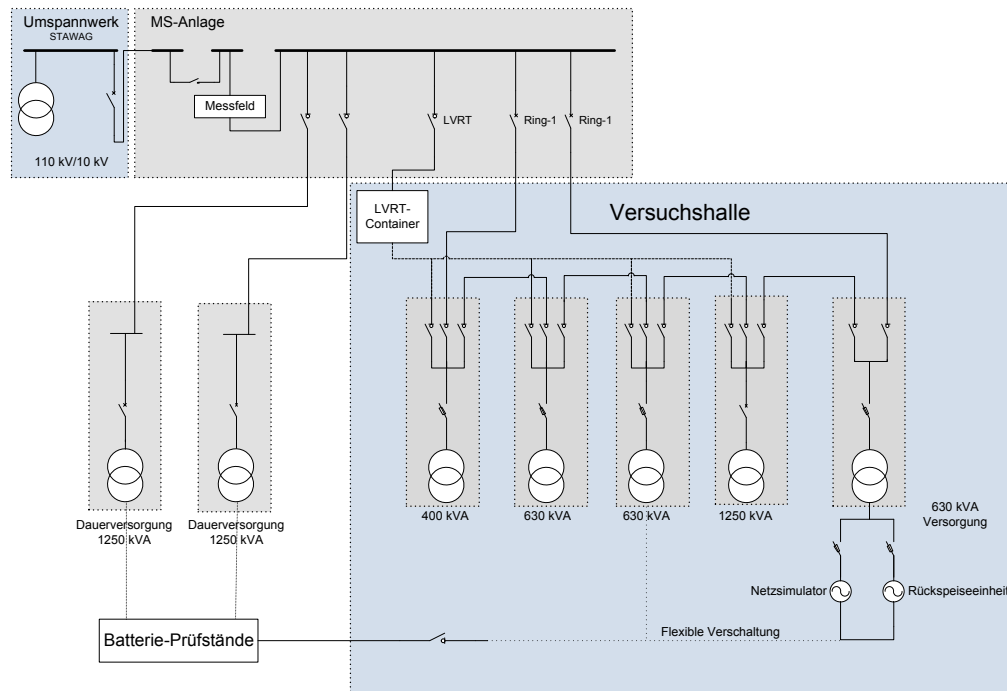


Abb. 4: Mittelspannungsverteilung Testzentrum

Der Aufbau verschiedener Teststränge wird durch Niederspannungsleitungen (NAYY-J 4x150 mm² bzw. NAYY-J 4x240 mm²) mit einer Gesamtlänge von über zwei Kilometern realisiert.

Neben der Nachbildung von Niederspannungsnetzen besteht die Möglichkeit zur synthetischen Erzeugung von Netzfehlern auf Mittelspannungsebene (bis 4MVA bei 10kV). Das "Low-Voltage-Ride-Through-Testsystem (LVRT-Testsystem)" basiert auf dem Prinzip eines induktiven Spannungsteilers. In Abhängigkeit der Dimensionierung von Quer- und Längsinduktivität kann ein kontrollierter Erdschluss im Testnetz erzeugt werden, ohne gleichzeitig unzulässige Spannungsabweichungen auf der Netzseite zuzulassen.

Derzeit werden derartige Tests unter anderem zur Überprüfung von Netzanschlussbe-

dingungen an Windenergieanlagen (IEC 61400-21) durchgeführt. Der zunehmende Ausbau dezentraler Energiewandlungseinheiten und Speichersysteme lässt eine Ausdehnung dieser Prüfverfahren für zukünftige Anwendungen (z.B. Batteriespeicher, Blockheizkraftwerke, PV-Großanlagen...) erwarten.

Kontakt

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

Dipl.-Ing. Bernhard Fuchs
fuchs@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-93038

Dipl.-Ing. Mathias Knaak
knaak@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94909

Hochspannungstechnische Gesellschaft (HTG) an der RWTH Aachen e.V.

Der Verein ist auch im zweiten Jahr nach seiner Gründung weiter gewachsen und zählt derzeit 37 Mitglieder, darunter auch einige Ehemalige, die erst vor kurzem ihre Promotion abgeschlossen haben und vom IFHT in die Industrie gewechselt sind. Auch im Jahr 2010 gab es eine Reihe von Aktivitäten des Vereins. Diese wurden auf der Mitgliederversammlung (Abb. 1) im Juni 2010 erörtert bzw. neu beschlossen. Ein entspannter Ausklang der Veranstaltung erfolgte anschließend im Restaurant „Elisenbrunnen“.



Abb. 1

Im Folgenden geben wir einen kurzen Überblick über die laufenden Aktivitäten der HTG:

Der Verein fördert Veröffentlichungen des wissenschaftlichen Nachwuchses. Hierunter zählen Peer-Review-Veröffentlichungen und Patentanmeldungen, zu denen im folgenden Jahr eine Reihe von Förderungen erwartet wird, so wie der Druck der Dissertation. Erste Zuschüsse hierzu wurden bereits ausgezahlt.

Ein weiterer Schwerpunkt war die Implementierung einer webbasierten Job- und Praktikumsbörse. In dieser geschlossenen

Datenbank können Studenten und Doktoren des Instituts eigene Gesuche für Arbeitsstellen, Master-/Diplomarbeiten, Praktika, Werksstudententätigkeiten etc. aufgeben, die per Newsletter an Mitglieder des Vereins und ggf. an teilnehmende Firmen versendet werden. Interessierte Studenten können hierzu beim Institut einen passwortgeschützten Zugang erhalten. Der Zugang berechtigt zudem dazu, explizit freigegebene Informationen der Mitglieder zu sehen und mit ihnen Kontakt aufzunehmen, so dass networking-Aktivitäten möglich sind.



Abb. 2

Der Jobbörse nebengeordnet ist eine webbasierte Vereinsdatenbank (Abb. 2). Jedes Mitglied kann sich fortan auf der HTG-Webseite im neu geschaffenen Mitgliederbereich einloggen und unter anderem folgende Funktionen nutzen:

- Ansicht der Mitgliederliste und der von den Mitgliedern freigegebenen Daten
- Direkte Kontaktmöglichkeit zu Mitgliedern (E-Mail-Funktion)
- Bearbeitung des eigenen Datenbank-Profiles

- Sichtung der Einträge in der Job-/Praktikumsbörse
- Downloadbereich (z.B. für Protokolle und Bilder der HTG-Veranstaltungen)

Zum Schluss möchten wir gerne noch einmal auf das kommende Ehemaligentreffen aufmerksam machen, welches am 27. / 28. Mai 2011 stattfinden wird und im Zeichen des 10-jährigen Dienstjubiläums von Prof. Armin Schnettler stehen wird. Wir freuen uns auf interessante Vorträge und anregende Gespräche. In diesem Rahmen wird auch

die nächste Mitgliederversammlung stattfinden, zu der auch noch unentschlossene Nichtmitglieder aus dem Kreis der Ehemaligen herzlich eingeladen sind.

Kontakt

Dr. Christian Cornelissen
Dr. Philipp Walter
mail@htg-aachen.de
www.htg-aachen.de



EEIM John Neal Award 2010

Andrey Mashkin, M. Sc. erhielt den John Neal Award 2010 des Europäischen Industrieverbandes "European Electrical Insulation Manufacturers" (EEIM). Der mit 5.000 Euro dotierte Preis wird für herausragende Untersuchungen auf dem Gebiet der Isoliermaterialien und -systeme verliehen. Seine Untersuchung "Analysis on the Electrical Properties of Syntactic Foam under Various DC Field Stresses" wurde von dem Preis-Komitee als die beste Untersuchung anhand der Kriterien technischer Inhalt, praktische Anwendbarkeit, Eigenständigkeit und Klarheit der Darstellung bewertet. Im Fokus der prämierten Untersuchung liegt die Analyse des elektrischen Verhaltens von syntaktischem Schaum, einem neuartigen besonders leichten Isolierstoff, welcher im Rahmen der Zusammenarbeit zwischen der RWTH Aachen und Philips Medical Systems (PMS) entstanden ist.

Syntaktischer Schaum

Die Entwicklung von vielen Komponenten der Hochspannungstechnik und elektrischer Energietechnik erfordert zunehmend kompaktere und leistungsfähigere Isoliersysteme. Insbesondere bei transportablen oder bewegten Systemen wird zudem eine Gewichtsreduktion angestrebt, die durch konventionelle Isoliermaterialien nicht mehr erreicht werden kann. Hier bietet sich der Einsatz von syntaktischem Schaum an - einer speziellen Schaumart, in der die Hohlräume in dem Polymer-Basismaterial nicht mehr durch Aufschäumen, sondern durch hohle Füllstoffe eingebracht werden. So werden in den betrachteten syntaktischen Schaum mikroskopische Glashohlkugeln in eine Epoxidharzmatrix eingebracht. Nach der Aushärtung des Epoxidharzes entsteht dabei ein Hartschaum. Das Materialgewicht

wird dabei um bis zu 40%, verglichen mit Epoxidharz reduziert. Die mechanischen und elektrischen Eigenschaften des Materials können dabei durch die Wahl geeigneter Mikrohohlkugelabmessungen und -füllgrade auf die jeweilige Anwendung angepasst werden. Eine Rasterelektronenmikroskopaufnahme (REM) eines Material-schnitts ist in Abb. 1 dargestellt.

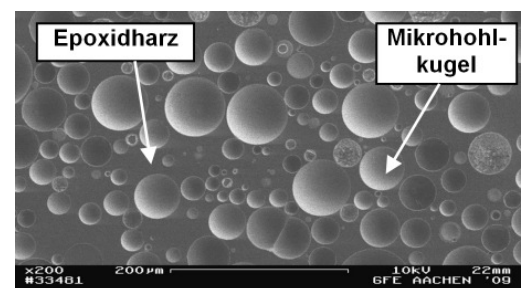


Abb. 1: REM-Aufnahme: mikroskopische Materialstruktur

Ziel der Untersuchungen

Die elektrischen Durchschlagmechanismen in syntaktischen Schäumen bei kurzzeitiger Gleich- und Wechselspannungsbelastung wurden am IFHT im Rahmen vorangegangener Untersuchungen bereits analysiert. Die dabei ermittelten elektrischen Durchschlagsfeldstärken im Bereich 20-40 kV/mm ermöglichten den Einsatz des Materials in der Hochspannungstechnik. Für einen breiten Einsatz des Materials in den Gleichspannungsanwendungen ist jedoch eine Kenntnis weiterer Prozesse in syntaktischem Schaum erforderlich. Dazu zählen die Einschwingvorgänge, die direkt nach Aufschaltung eines elektrischen Feldes auftreten, sowie die Alterungsprozesse im Material. Im Rahmen der prämierten Untersuchung wird syntaktischer Schaum in Hinblick auf einen möglichen Einsatz als Hochspannungsisolierung

in Gleichspannungs-Betriebsmitteln untersucht. Dabei werden einige Parameter ermittelt, die eine Dimensionierung der Isolierung in Bezug auf maximale Lebensdauer und Spannungsfestigkeit ermöglichen können. Zu charakteristischen Zeitpunkten - zu Beginn und nach einer andauernden Einwirkung der Belastung - werden die Beanspruchung der Materialkomponenten und die elektrischen Eigenschaften des Gesamtmaterials analysiert. Zum Abschluss werden die bereits bestehenden Modelle zum Durchschlagmechanismus um die erzielten Erkenntnisse zum Schädigungs geschehen und zur Feldverteilung im Material erweitert. Die Untersuchungen bieten eine Grundlage zum Einsatz des Materials auf einem breiten Feld von Komponenten der Hochspannungs-Gleichstrom-Energieübertragung (HVDC) bis hin zur Gleichspannungs-Prüftechnik.

Überblick über die Ergebnisse

Im Rahmen der Untersuchungen werden verschiedene syntaktische Schäume mit einer Stufenspannung beaufschlagt. Im Inneren des Materials werden dadurch transiente Prozesse hervorgerufen. Die Leitfähigkeiten sowie die Spannungsfestigkeiten der Materialien bei Eintritt der Stufenbelastung werden bestimmt. Die elektrische Feldverteilung im Material wird analysiert und das Durchschlagsmodell wird erweitert. Die Durchschlagsfeldstärke bei einer Langzeitbelastung wird in Abhängigkeit von der Belastungsdauer in einem Zeitbereich bis 5000 h untersucht. Die Zeit bis zum Durchschlag wird dabei für die Feldstärken 16, 18 und 20 kV/mm gemessen. Die ermittelten Leitfähigkeitswerte im transienten Vorgang bieten alle erforderlichen Informationen zur numerischen Feldberechnung in Isoliersystemen mit syntaktischen Schäumen. Die beobachteten Durchschlagskennwerte ermöglichen einen dauerhaften Einsatz von syntaktischem Schaum in Hochspannungskompo-

nenten und können zusammen mit Leitfähigkeitswerten als Designkriterien bei der Entwicklung von leichten und leistungsfähigen Isoliersystemen genutzt werden.

Download

Eine Synopsis der Untersuchung steht unter www.ifht.rwth-aachen.de/EEIM_JNA2010_synopsis.pdf zum Download bereit.

Die Preisverleihung

Die Verleihung des EEIM John Neal Awards erfolgte am 01. Oktober 2010 im Rahmen eines Festaktes zum 90-jährigen Jubiläum des Rogowski-Instituts in Aachen. Besonderen Glanz verlieh der Veranstaltung die Anwesenheit des Dekans der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der RWTH Aachen, sowie Mitgliedern des Preiskomitees, Vertretern der Generatorentwicklung von Philips Medical Systems, Professoren und Mitarbeitern sowie Ehemaligen. Im Namen seines Teams bedankte sich der Preisträger für die hohe Ehre bei dem Preiskomitee.



Abb. 2: Preisverleihung: v.l.n.r.: Berno Habertür (EEIM), Michael Chapman (EEIM), Anja Strauchs (IFHT), Andrey Mashkin (IFHT), Patrick Veluzat (EEIM), Nobert Rudat (EEIM), Jörn Podlazly (PMS), Prof. Armin Schnettler (IFHT)

Kontakt

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



Mitarbeiter des IFHT 2010

