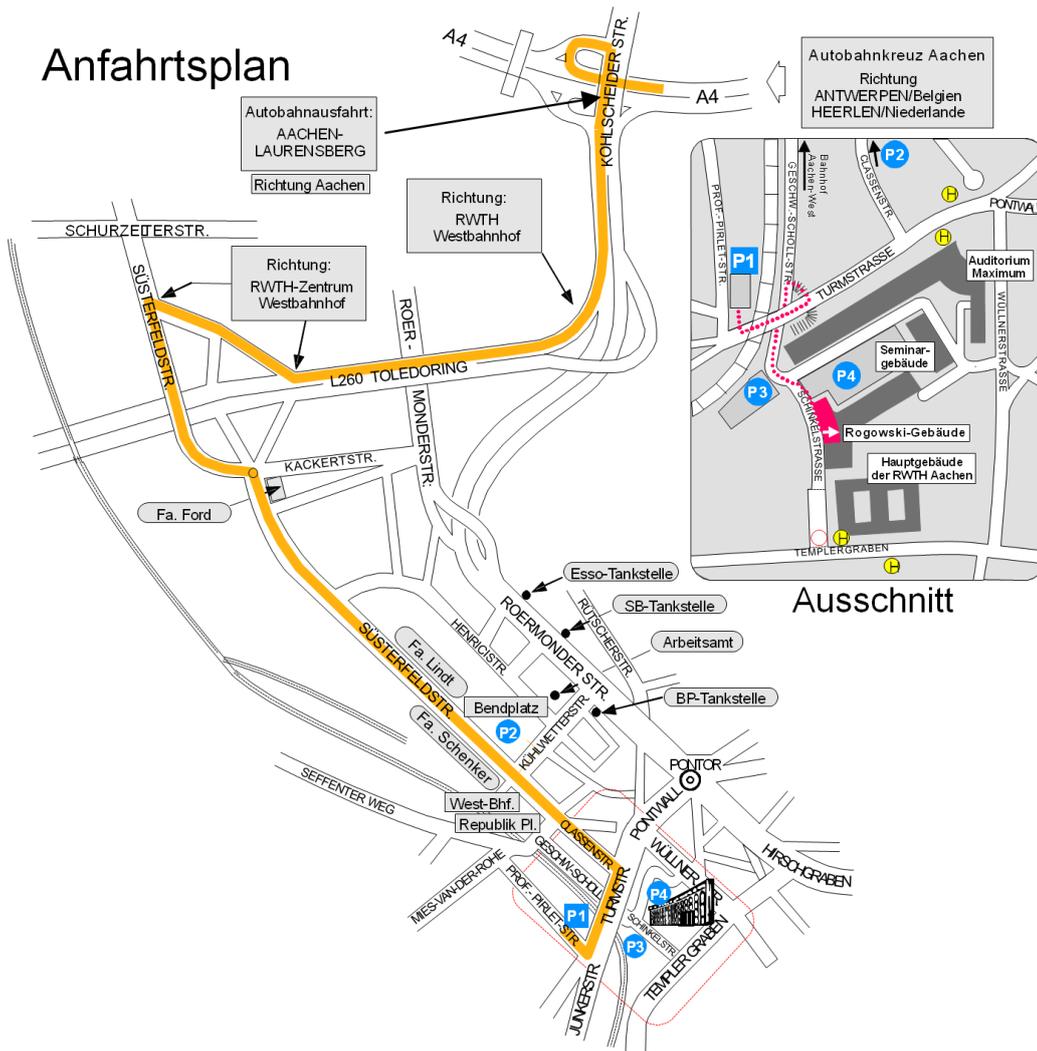


Jahresbericht
2011/12

Institut für Hochspannungstechnik
 Schinkelstraße 2
 52056 Aachen
 Germany

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



Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Armin Schnettler
 Institut für Hochspannungstechnik der Rheinisch-
 RWTH Aachen University

Redaktion: Dipl.-Ing. T. Helmschrott
 Redaktionsschluss: 30.06.2012

Inhaltsverzeichnis

Vorwort..... 4

Forschung am IFHT

Forschungsgebiete 8
 Berichte aus der Abteilung Isolierte Systeme und Diagnostik 12
 Berichte aus der Abteilung Netztechnik 23
 Berichte aus der Abteilung Nachhaltige Energiesysteme 38
 Dissertationen 59

Lehre am IFHT

Neues aus der Lehre 70
 Vorlesungen und Praktika 74
 Seminare 80
 Diplom-, Master-, Bachelor- und Studienarbeiten 84

Das Institut

Chronik 108
 Veröffentlichungen 112
 Technische Exkursionen 116
 Ökobilanzwerkstatt 121
 Dienstleistungen 122
 Prüf- und Qualifizierungszentrum 123
 HTG 128
 Preise und Auszeichnungen 130
 Mitarbeiter 133

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

die Energiewende im allgemeinen, der Ausstieg aus der Kernenergie, der weitere Ausbau der erneuerbaren Energieträger sowie der damit verbundene Netzausbau im speziellen haben unsere Aktivitäten in 2011 wesentlich beeinflusst. Wir haben uns frühzeitig dafür entschieden, unsere Aktivitäten auf die gesamte Energieinfrastruktur zu fokussieren – neben der Stromversorgung sind damit auch die Interaktionen mit den Energieträgern Gas und Wärme/Kälte sowie die Kombination mit der Energieversorgung für die Mobilität verbunden. Es ist für eine moderne Energieversorgung zwingend erforderlich, all diese Energieträger und Anwendungen kombiniert und optimiert zu betrachten.

Daher setzen wir auf eine integrale Betrachtung zukünftiger Energiesysteme und deren Anforderungen an Technologien (u.a. durch Betrachtung von Szenarien mit bewusst langen Zeiträumen bis 2030++) sowie deren Verbindung mit technologischen Entwicklungen, die wiederum Einfluss auf die Energiesysteme nehmen können. Hierbei betrachten wir „Nachhaltigkeit“ nicht nur in ökologischer Hinsicht, sondern streben ein nachhaltiges Energiesystem mit technisch-wirtschaftlicher Ausprägung, ökologischem Anspruch und maximaler öffentlicher Akzeptanz an.

Einen großen Teil unserer Forschungsarbeiten verbinden wir mit der Entwicklung von Methoden und Modellen – und deren Verifikation durch Studien, industrieller Anwendung und umfangreichen Untersuchungen in den Laboratorien. Damit einhergehend ist ein kontinuierlicher Ausbau der eigenen Infrastruktur – von der Bereitstellung der Büro- und Rech-

ner(cluster)kapazität über die Einrichtung neuer Laboratorien bis zur Inbetriebnahme unseres Testzentrums für „Smart Grid Technologien“, in dem wir ein eigenes 10kV-Mittelspannungsnetz mit mehreren (intelligenten) Ortsnetzstationen und unterlagerten Niederspannungsnetzen betreiben können.

Dem weiteren Wachstum entsprechend haben wir in 2011 eine neue Führungsstruktur eingeführt, bei der wir die wesentlichen operativen Aufgaben in drei Forschungsabteilungen überführt haben. Das Institut wird seitdem von einem Führungskreis, bestehend aus den Herren Dr. Puffer (stellv. Institutsleiter), Dr. Hille (Oberingenieur), Dr. Keßler, Dr. Kurz, Herrn Dederichs (seit 01/2012 Herr Scheufen) und mir geführt. Das IFHT konnte in 2011 insgesamt auf 43 wissenschaftliche MitarbeiterInnen, 96 studentische MitarbeiterInnen und 18 nicht-wissenschaftliche MitarbeiterInnen beschäftigen und zählt damit zu den größten Instituten der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik bzw. der RWTH Aachen insgesamt. Mit 95 Abschlussarbeiten (Bachelor, Master, Diplom) sowie 7 Studien- und 5 Projektarbeiten gerieten wir an unsere (räumliche) Auslastungsgrenze. Auch für die nächsten Jahre erwarten wir steigende Absolventenzahlen – mit über 160 Studierenden in der Vorlesung Hochspannungstechnik und über 400 Studierenden in den Vorlesungen „Freileitungen“, „Schutzmaßnahmen“, „Power Cables“, „Unternehmensführung für Ingenieure“ sowie im Seminar „Schutz- und Leittechnik“ ist die Nachfrage nach unseren Inhalten weiter groß.

Auch 2011 konnten wir verschiedene Auszeichnungen verzeichnen. Für die Herren Srisupha und Dr. Hille den ECTI-CON Best Paper Award, für die Herren Eichhoff und Helmschrott die Springorum-Denk Münze sowie die Otto-Junker-Preise für die besten Abschlüsse in der elektrischen Energietechnik, für Herrn Natemeyer den RWE-Zukunftspreis und den STAWAG-Preis, für Herrn Koopmann den Trianel-Preis und für Herrn Wasowicz den Friedrich-Wilhelm-Preis. Die Herren Dr. Hille und Dr. Kurz konnten zudem erfolgreich ihre Promotion am IFHT abschließen. Allen Preisträgern und Doktoren gratulieren wir herzlich für die Erfolge und wünschen für die weitere Zukunft alles erdenklich Gute.

Das Drittmittelvolumen erreichte 2011 mit 5 Millionen Euro den bisherigen Höchstwert und hat uns aufgezeigt, dass effiziente Prozesse sowie umfangreiche Erfahrungen in der Beschaffung und in der Projektabwicklung wichtiges Gut und Expertise darstellen können.

Im Wintersemester 2011/2012 haben sich in der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik etwa 1000 Studierende eingeschrieben (Bachelor und Master). Nachdem bereits der Bachelor-Studiengang „Wirtschaftsingenieurwesen Elektrische Energietechnik“ mit einer Zulassungsbeschränkung versehen wurde, wird voraussichtlich im Wintersemester 2012/2013 auch für den Bachelor-Studiengang „Elektrotechnik und Informationstechnik“ ein Numerus Clausus eingeführt. Persönlich bedaure ich diese Entwicklung und halte eine Zulassungsbeschränkung und eine Auswahl über Schulabschlussnoten für widersinnig und ungeeignet und hoffe, dass diese Vorgehensweise nur von kurzer Dauer sein wird.

Im Einzelnen soll Ihnen der Jahresbericht 2011 in bewährter Form detailliert Aus-

kunft über unsere Forschungsarbeiten, die Lehre und die Projekte sowie über unsere Dienstleistungen und das Institutsleben geben.

Natürlich gilt unser aller Dank

- den vielen Freunden und Partnern für die freundlichen Förderungen und Anregungen sowie
- den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern für ihre Zuversicht, das Engagement und die Kreativität.

Wir sind bestrebt, weiterhin kontinuierlich an uns zu arbeiten und mit Einsatz, Freude und Leidenschaft Neues zu erschaffen und Erreichtes umzusetzen – aber auch den Erfolg zu genießen.

Wir freuen uns auf die weitere Zusammenarbeit mit Ihnen!

Herzliche Grüße aus Aachen

Ihr





Forschung am IFHT

Forschungsgebiete

Forschungsabteilung „Isoliersysteme und Diagnostik“

Abteilungsleiter: Dr.-Ing. Michael Keßler

Kurzbeschreibung

Die Forschungsabteilung 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 konzentrierten Einzelzündfunken viele kurze Entladungen in serieller Folge erzeugt werden, um eine gleichmäßige Zündung des Kraftstoff-Luftgemisches sicherzustellen.

Mitglieder der Abteilung

Dr.-Ing. Michael Keßler * Dipl.-Ing. Gregor Brammer * Dipl.-Ing. Christoph Roggendorf *
 Dipl.-Ing. Anja Strauchs * Dipl.-Ing. Jens Knauel * Dipl.-Ing. Benjamin Preidecker *
 Dipl.-Ing. Daniel Winkel * Dipl.-Wirt.-Ing. André Wagner

Forschungsabteilung „Netztechnik“

Abteilungsleiter: Dr.-Ing. Andreas Kurz

Kurzbeschreibung

Die Forschungsabteilung Netztechnik leistet mit ihren Arbeiten einen Beitrag zum sicheren, zuverlässigen, ökonomischen und ökologischen Betrieb unserer gegenwärtigen und zukünftigen elektrischen Verteil- und Transportnetze.

Politische, gesellschaftliche und technische Anforderungen an ein Energieversorgungsnetz werden unter Berücksichtigung aktueller und erwarteter Entwicklungen aufgenommen und praxisorientierte Lösungsstrategien zu deren Umsetzung erarbeitet. Der Forschungsschwerpunkt umfasst sowohl die Definition der technischen Anforderungen an die Komponenten und Betriebsmittel eines elektrischen Netzes als auch deren technische Realisierung.

Aktuelle Fragestellungen beschäftigen sich beispielsweise mit der Einbindung von DC-Technologien, der Bewältigung von Transportengpässen durch Freileitungsmonitoring und dem vollständigen Ersatz des klimaschädlichen Gases SF₆ aus den elektrischen Anlagen. Darüber hinaus werden im Bereich des Asset Managements die Möglichkeiten eines "Smart-Grids" zum zielgerichteten und optimierten Einsatz der Betriebsmittel analysiert und in Expertentools eingebunden.

Die Forschungsabteilung zeichnet sich sowohl durch ihre umfangreiche labortechnische Ausstattung zur experimentellen Bearbeitung der Fragestellungen als auch durch ihr tiefes theoretisches Verständnis der physikalischen Vorgänge aus.

Mitglieder der Abteilung

Dr.-Ing. Andreas Kurz * Dipl.-Ing. Matthias Hoffacker * Dipl.-Ing. Michael Peitz * Dipl.-Ing. Daniel Eichhoff * Dipl.-Ing. Stylianos Filippidis * Dipl.-Wirt.-Ing. Alexander Gitis * Dipl.-Ing. Gregor Nikolic * Sebastian Wetzeler, M.Sc. B.Eng.

Forschungsabteilung „Nachhaltige Energiesysteme“

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

Kurzbeschreibung

Die fortschreitende Durchdringung der Systeme der Energieversorgung mit Informations- und Kommunikationstechnologie sowie der Wandel hin zu einer nachhaltigen, klimaneutralen Erzeugungsstruktur macht eine systemische Modellierung zwingend erforderlich. Daher liegt der Fokus der Forschungsabteilung auf der Modellierung und Bewertung integrierter Energiesysteme.

Hierunter werden insbesondere 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 Abteilung sind dabei 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. Dadurch wird eine ganzheitliche Bewertung zukünftiger Technologien ebenso ermöglicht wie die Ausbauplanung multinationaler Energiestrukturen, beispielsweise in den europäischen Forschungsprojekten IRENE oder G4V.

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

Mitglieder der Abteilung

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Thomas Dederichs * Dipl.-Ing. Claas Matrose * Thomas Pollok, M.Sc. * Dipl.-Ing. Martin Scheufen * Dipl.-Wirt.-Ing. Eva Szczechowicz * Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Markus Gödde * Dipl.-Ing. Thomas Helmschrott * Dipl.-Ing. Stefan Krenzel * Dipl.-Ing. Ann-Kathrin Meinerzhagen, M.A. * Dipl.-Ing. Hendrik Natemeyer * Dipl.-Wirt.-Ing. Baris Özalay * Dipl.-Wirt.-Ing. Fabian Potratz * Dipl.-Wirt.-Ing. Stephan Raths * Dipl.-Wirt.-Ing. Andreas Roehder * Dipl.-Wirt.-Ing. Alexander Stroband * Dipl.-Wirt.-Ing. Robert Tempels * Dipl.-Wirt.-Ing. Bartholomäus Wasowicz * Dipl.-Ing. Sebastian Winter * Dipl.-Ing. Tilman Wippenbeck * Dipl.-Ing. Bernhard Fuchs



Syntaktischer Schaum als Isoliermaterial für verschiedene Anwendungsgebiete der Hochspannungstechnik

Syntaktischer Schaum ist ein Verbundmaterial aus einer Polymermatrix und eingebetteten Mikrohohlkugeln. In der vorliegenden Parameterstudie wird die elektrische Durchschlagfeldstärke bei Wechselspannungsbelastung im Kurzzeitbereich für syntaktischen Schaum aus verschiedenen Materialzusammensetzungen betrachtet. Der Fokus liegt hierbei auf einer Variation des Füllstoffanteils von Glas- und Polymermikrohohlkugeln. Der Einfluss von zusätzlich in das Material eingebrachten Quarzmehlpartikeln wird ebenfalls betrachtet. Weiterhin wird die Einsetzbarkeit von syntaktischem Schaum in supraleitenden Hochspannungsanwendungen als Flüssigstickstoffersatz in der Funktion als Isolationssystem untersucht. Mittels der erzielten Erkenntnisse können Designkriterien zur geeigneten Verwendung von syntaktischem Schaum als Isoliermaterial für verschiedene Anwendungsgebiete der Hochspannungstechnik bestimmt werden. Hierdurch können die Materialeigenschaften anwendungsspezifisch optimiert werden, um eine hohe Zuverlässigkeit bei niedrigen Kosten zu gewährleisten.

Einleitung und Motivation

Zukünftige Isoliermaterialien werden zunehmend mit einem weiten Anforderungsspektrum konfrontiert. Neben guten elektrischen Eigenschaften, insbesondere einer hohen elektrischen Spannungsfestigkeit, spielen ein kompaktes Design sowie geringe Materialkosten eine immer bedeutendere Rolle. Syntaktischer Schaum bietet hierbei eine mögliche Alternative zu herkömmlichen Isoliermaterialien wie z.B. Isolierölen oder mineralisch gefüllten Polymeren. Syntaktischer Schaum besteht aus einer Polymermatrix und hohlen Mikropartikeln, den sogenannten Mikrohohlkugeln. Die Mikrohohlkugeln weisen typischerweise Durchmesser im Bereich zwischen 30 und 100 µm auf. Syntaktischer Schaum zeigt in Voruntersuchungen gute elektrische Eigenschaften bei gleichzeitig geringen Materialkosten [1-3].

Der Name „syntaktischer Schaum“ resultiert aus der mikroskopischen Struktur des Materials, die durch die Vielzahl an Mikrohohlkugeln einer Schaumstruktur gleicht.

Abb. 1 zeigt eine Rasterelektronenmikroskop (REM) Aufnahme der Materialstruktur. Aufgrund seiner Schaumstruktur weist das Material eine sehr geringe spezifische Dichte auf (typischerweise um 0,65 g/cm³), wodurch ein sehr leichtes und kompaktes Design erzielt werden kann.

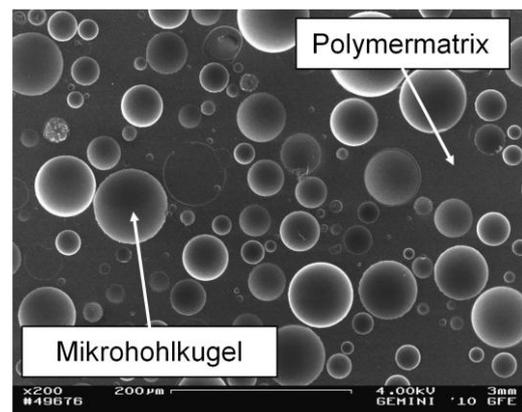


Abb. 1: REM-Aufnahme von syntaktischem Schaum

Laufende Untersuchungen am Institut für Hochspannungstechnik der RWTH Aachen University beschäftigen sich mit dem Einfluss verschiedener Materialzusammensetzungen auf die elektrischen, mechanischen

und thermischen Eigenschaften von syntaktischem Schaum. Ein neues Themengebiet besteht in der Untersuchung der Anwendbarkeit des Materials in Isoliersystemen der Supraleitertechnik, d.h. unter kryogener Temperatur. Die in 2011 durchgeführten Untersuchungen beschäftigen sich mit dem Einfluss verschiedener Materialmodifikationen auf die Kurzzeit-Durchschlagsfeldstärke unter Wechsellastbelastung. Epoxidharz dient als Matrixmaterial und wird mit diversen hohlen Glas- oder Kunststoff- Mikrohohlkugeln gefüllt, wobei die Füllgrade zwischen 30 Vol.-% und 50 Vol.-% variieren. Syntaktische Schäume mit niedrigeren Füllgraden haben beispielsweise eine geringere Viskosität, mit steigendem Füllgrad sinken jedoch Dichte und Preis. Andere Eigenschaften einschließlich der mechanischen Flexibilität, den dielektrischen Eigenschaften oder der thermischen Leitfähigkeit können durch in den syntaktischen Schaum eingebrachte Additive wie Quarzmehlpartikel modifiziert werden. Für jede Modifizierung des Verbundstoffes ist es wichtig, die resultierenden elektrischen Eigenschaften zu berücksichtigen, um ein optimales Design des Isolationssystems zu gewährleisten.

Materialzusammensetzungen von syntaktischem Schaum

Durch die Verwendung verschiedener Füllgrade und/ oder unterschiedlicher Füllstoffe bietet syntaktischer Schaum die Möglichkeit, eine Vielzahl von Materialeigenschaften einzustellen. Der Einsatz von Mikrohohlkugeln ermöglicht ein preisgünstiges Material mit geringer Dichte. Desweiteren wird durch das Gas in den Kugeln die Permittivität des Gesamtmaterials gesenkt. Alle diese Eigenschaften verbessern sich mit steigendem Füllgrad. Die Dichte und die Permittivität können durch die Verwendung von Mikrohohlkugeln mit größerem Durchmesser gesenkt werden, da hier-

durch der Anteil des Gasvolumens gesteigert wird. Andererseits kann die Durchschlagsfestigkeit mit sinkender Kugelgröße gesteigert werden. Die mechanischen Eigenschaften können durch verschiedene Kugeltypen modifiziert werden. Glas- mikrohohlkugeln ermöglichen eine gesteigerte mechanische Festigkeit, während Kunststoffmikrohohlkugeln die Flexibilität des Materials verbessern.

Generell ist die thermische Leitfähigkeit von syntaktischem Schaum auf Grund des Gases in den Mikrohohlkugeln gering. Sie sinkt mit steigenden Füllgraden. Zur besseren Abgabe von Verlustwärme an die Umgebung, ist bei den meisten Anwendungen ist eine hohe thermische Leitfähigkeit des Isolierstoffs erwünscht. Dazu können feste Quarzmehlpartikel als Additive hinzugefügt werden. Für spezielle Anwendungen, z.B. im supraleitenden Bereich, bei dem das Isolationsmaterial im kryogenen Temperaturbereich arbeitet, ist eine geringe thermische Leitfähigkeit vorteilhaft, um die Erwärmung des Systems durch die Umgebung zu minimieren. Hier könnte syntaktischer Schaum ohne weitere Additive ein geeigneter Isolierstoff sein.

Materialcharakterisierung

Der verwendete syntaktische Schaum besteht aus einem heißhärtenden Gießharzsystem gefüllt mit 30, 40 bzw. 50 Vol.-% an Mikrohohlkugeln. Bei einer Verwendung von Füllstoffanteilen oberhalb 50 Vol.-% kommt es zu einem starken Anstieg der Mischviskosität. Dies würde zu einer verringerten Materialqualität führen. Es werden sowohl Mikrohohlkugeln aus Glas als auch aus Kunststoff untersucht. Tabelle 1 bietet einen Überblick über die verwendeten Materialzusammensetzungen.

Material	Mittlerer Durchmesser	Füllgrad
Borosilikatglas	40 μm	30 Vol.-%
Acrylnitril copolymer mit CaCO_3 Beschichtung		40 Vol.-%
		50 Vol.-%

Tabelle 1: Mikrohohlkugelparameter

Des Weiteren wird eine Kombination aus Kunststoffmikrohohlkugeln und Quarzmehlparkeln untersucht. Der Gesamtfüllgrad wird hierbei auf 50 Vol.-% festgelegt, während das Verhältnis der verschiedenen Füllstoffpartikel zueinander variiert. Für diese Untersuchungen werden silanisierte Quarzmehlparkeln mit einer durchschnittlichen Größe von 16 μm und Mikrohohlkugeln mit einem Durchmesser von 90 μm verwendet. In Tabelle 2 sind alle untersuchten Füllstoffverhältnisse angegeben.

Füllgrad	
Kunststoff- Mikro- hohlkugeln	Quarzmehlparkeln
50 Vol.-%	0 Vol.-%
40 Vol.-%	10 Vol.-%
30 Vol.-%	20 Vol.-%

Tabelle 2: Verhältnis zwischen Kunststoffmikrohohlkugeln und Quarzmehlparkeln

Experimentelle Untersuchungen

Die elektrische Durchschlagfeldstärke für Wechselspannungsbelastung wird entsprechend IEC 60243-1 bestimmt [4]. Hierbei wird die Prüfspannung jede 20 s bis zum Durchschlag des Materials erhöht. Die Stufenhöhe ist eine Funktion der Startspannung, die in [4] definiert ist. Abb. 2 zeigt den Versuchsaufbau. Bei den Untersuchungen unter Raumtemperatur befinden sich die Prüflinge in einem ölge-

füllten Prüfgefäß zur Vermeidung von äußeren Überschlügen. Die Untersuchungen bei kryogener Temperatur werden in flüssigem Stickstoff (LN_2) durchgeführt. Hierzu wird ein Gefäß aus expandiertem Polypolylen (EPP) verwendet. Da die Untersuchungen bei Umgebungsdruck durchgeführt werden, weist der flüssige Stickstoff eine Temperatur von 77 K auf.

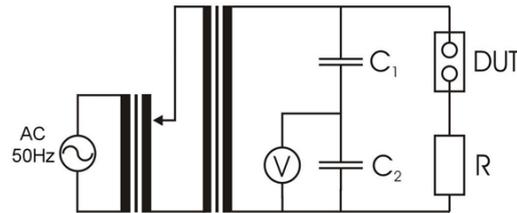


Abb. 2: Versuchsaufbau

- C_1, C_2 : Kapazitiver Teiler
- R: Strombegrenz. Widerstand
- DUT: Prüfling

Die Prüflinge beinhalten eine Kugel-Kugel-Elektrodenanordnung. Die Elektroden weisen einen Durchmesser von 12 mm auf. Die Schlagweite zwischen den Elektroden beträgt 2 mm. Hieraus ergibt sich ein Schwaigerfaktor von 0,865. Pro Material werden jeweils fünf Proben getestet.

Ergebnisse und Diskussion

Einfluss des Mikrohohlkugeltyps

Die Ergebnisse die Abb. 3 zeigen jeweils die Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall. Es werden Glas- und Kunststoffmikrohohlkugeln mit einem mittleren Durchmesser von 40 μm als Füllstoff betrachtet. Für alle Füllgrade kann beobachtet werden, dass die Durchschlagfeldstärke von Proben mit Kunststoffmikrohohlkugeln über der von Glasmikrohohlkugeln liegt.

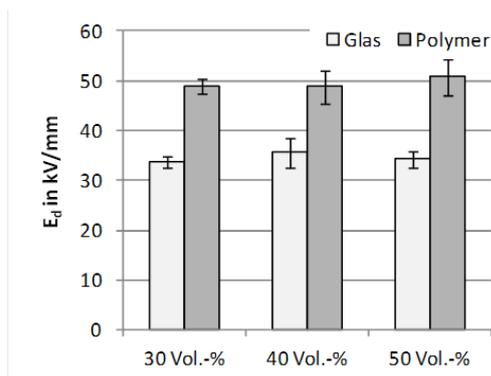


Abb. 3: Durchschlagfeldstärke von Proben mit unterschiedlichen Mikrohohlkugeltypen (Glas und Kunststoff)

Die Kunststoffmikrohohlkugeln bestehen aus einer 0.1-1 μm dicken Polymerschicht mit einer etwa 5 μm dicken CaCO_3 Beschichtung. Im Vergleich dazu sind die Glasmikrohohlkugeln unbeschichtet und weisen eine Wandstärke von 1 μm auf. Es ist bekannt, dass der Durchschlagsprozess in epoxidharzbasierten syntaktischen Schäumen unter Wechsellastspannungsbelastung durch Gasentladungen innerhalb der Mikrohohlkugeln initiiert wird. Dies führt zu einer Erosion der Mikrohohlkugeln und letztendlich zum Durchschlag des Gesamtmaterials [5]. Folglich ermöglichen die größeren Wandstärken der Kunststoffmikrohohlkugeln eine höhere Widerstandsfähigkeit gegen den Erosionsprozess.

Einfluss des Füllgrades

Die oben vorgestellten Untersuchungen (Abb. 3) beinhalten unterschiedliche Füllgrade. Ein signifikanter Einfluss des Mikrohohlkugelfüllgrades auf die elektrische Durchschlagfeldstärke des Materials kann nicht beobachtet werden. Dieser Effekt ist vom Kugeltyp unabhängig.

Zur Erklärung dieses Effekts werden für typische Anordnungen in syntaktischem Schaum numerische 3D-Feldsimulationen durchgeführt. Abb. 4 und Abb. 5 zeigen die

Ergebnisse für Füllgrade von 30 Vol.-% bzw. 50 Vol.-%. Die homogene Hintergrundfeldstärke beträgt 25 kV/mm.

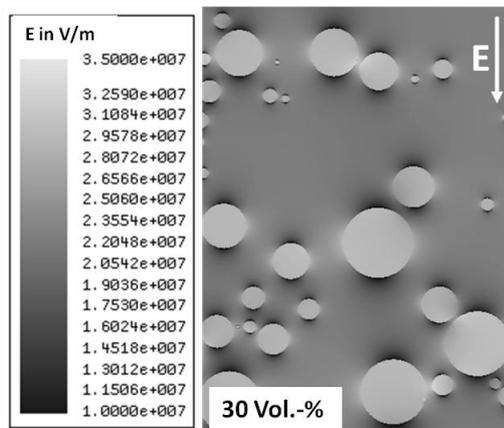


Abb. 4: Feldsimulationen von syntaktischem Schaum mit 30 Vol.-% Mikrohohlkugelfüllgrad

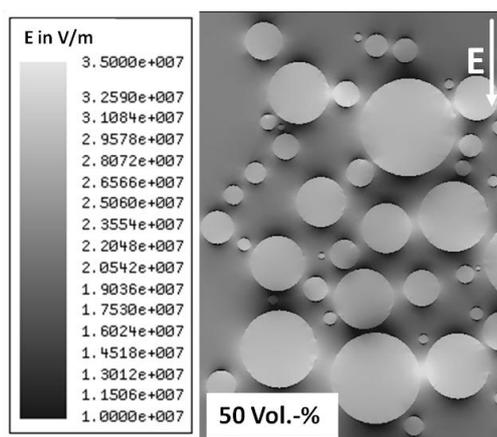


Abb. 5: Feldsimulationen von syntaktischem Schaum mit 50 Vol.-% Mikrohohlkugelfüllgrad

Die Simulationen zeigen für beide Füllgrade ähnliche Maximalfeldstärken innerhalb der Mikrohohlkugeln. Deshalb kann angenommen werden, dass die Gasentladungsaktivität bei unterschiedlichen Füllgraden bei der gleichen Hintergrundfeldstärke einsetzt. Folglich ist die elektrische Durchschlagfeldstärke des Materials im betrachteten Rahmen vom Mikrohohlkugelfüllgrad unabhängig.

Einfluss zusätzlicher Quarzmehlpartikel

Abb. 6 zeigt den Einfluss zusätzlicher Quarzmehlpartikel auf die elektrische Durchschlagfeldstärke. Das Material hat einen konstanten Füllstoffanteil von 50 Vol.-% für alle Proben. Das Verhältnis von Mikrohohlkugeln und Quarzmehlparkeln wird variiert. Die Ergebnisse sind als Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall angegeben.

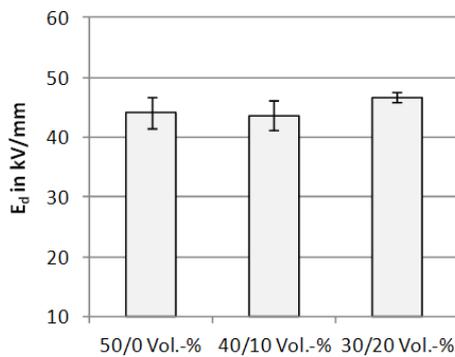


Abb. 6: Durchschlagfeldstärke von Proben mit zusätzlichen Quarzmehlparkeln (Mikrohohlkugeln/Quarzmehlpartikel 50 Vol.-%)

Die Ergebnisse zeigen keinen signifikanten Einfluss des Mischungsverhältnisses von Mikrohohlkugeln zu Quarzmehlparkeln. Wie zuvor gezeigt, hat der Füllstoffanteil der Mikrohohlkugeln keinen Einfluss auf die elektrische Durchschlagfeldstärke. Hieraus kann geschlossen werden, dass eine zusätzliche Beimengung von Quarzmehlparkeln keinen Einfluss auf die elektrische Durchschlagfestigkeit bei Kurzzeit-Wechselspannungsbelastung hat.

Einfluss kryogener Temperatur

Der Einfluss von kryogenen Temperaturen (KT) auf die elektrische Durchschlagfeldstärke von glas- oder kunststoffmikrohohlkugelgefülltem syntaktischem Schaum ist in Abb. 7 bzw. Abb. 8 dargestellt. Als Referenzwert wird die Durchschlagfeldstärke

beim Raumtemperatur (RT) verwendet. Die Ergebnisse sind als Mittelwerte mit 95 % Vertrauensintervall angegeben.

Der Vergleich der Ergebnisse bei Raum- und bei kryogener Temperatur zeigt, dass die Durchschlagfeldstärke von mit Glas-mikrohohlkugeln gefülltem syntaktischem Schaum im betrachteten Bereich nahezu temperaturunabhängig ist, während die Durchschlagfeldstärke von mit Kunststoffmikrohohlkugeln gefülltem syntaktischem Schaum für alle betrachteten Füllgrade sinkt.

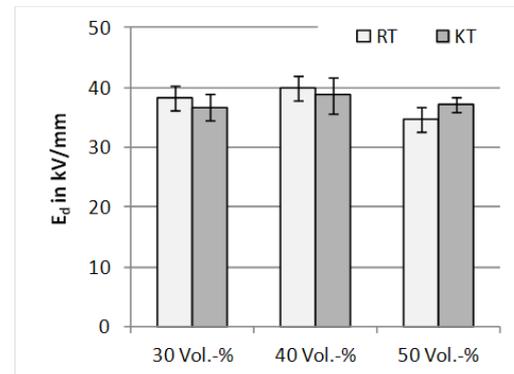


Abb. 7: Durchschlagfeldstärke von Proben mit Glasmikrohohlkugeln (Raum- und Kryotemperatur)

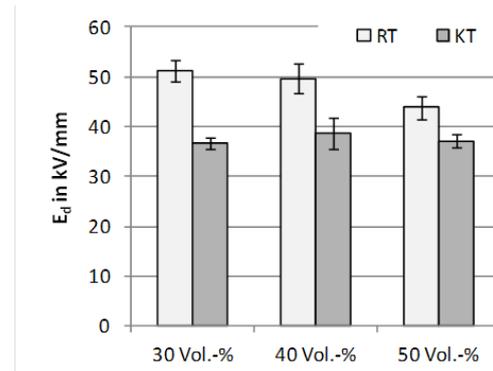


Abb. 8: Durchschlagfeldstärke von Proben mit Kunststoffmikrohohlkugeln (Raum- und Kryotemperatur)

Durch Abkühlen des syntaktischen Schaumes auf 77 K sinkt der Druck innerhalb der

Mikrohohlkugeln aufgrund des idealen Gasgesetzes [6]:

$$p V = n R T$$

p = Druck in Pascal (Pa)

V = Volumen in Kubikmeter (m³)

n = Teilchenzahl

R = Gaskonstante in (J/(K mol))

T = Temperatur in Kelvin (K)

Wie oben erwähnt, wird der elektrische Durchschlagsprozess unter Raumtemperatur von Gasentladungsaktivitäten innerhalb der Mikrohohlkugeln initiiert. Auf Grund des in den Mikrohohlkugeln verringerten Drucks kann ein Anstieg der Durchschlagfestigkeit vermutet werden. Dies spiegelt sich jedoch nicht in den Ergebnissen wieder. Vielmehr wird vermutet, dass die Epoxidharzmatrix während des Abkühlens auf Grund innerer Spannungen mechanisch vorgeschädigt wird. Dies führt zu Mikrorissen, die den Durchschlagsprozess dominieren, und in einer füllgradunabhängigen Durchschlagsfeldstärke bei kryogener Temperatur resultieren.

Weitere Untersuchungen zur Klärung der auftretenden Phänomene bei kryogener Temperatur sind für 2012 geplant.

Zusammenfassung und Ausblick

Die in 2011 durchgeführten Untersuchungen konzentrieren sich auf den Einfluss verschiedener Mikrohohlkugeltypen und Füllgrade auf die elektrische Durchschlagsfeldstärke von epoxidharz-basiertem syntaktischem Schaum unter Kurzzeit-Wechselspannungsbelastung.

Syntaktischer Schaum ermöglicht es, die Materialeigenschaften über eine Variation des Füllgrades und der Füllstoffe einzustellen. Beispielsweise können Quarzmehlpartikel zur Erhöhung der thermischen Leitfähigkeit

hinzugefügt werden. Das Kugelwandmaterial kann variiert werden, um die mechanischen Eigenschaften zu beeinflussen.

Es wurden für unterschiedliche Materialzusammenstellungen und Temperaturen elektrische Durchschlagversuche im Kurzzeitbereich durchgeführt. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Kunststoffmikrohohlkugeln weisen eine höhere elektrische Festigkeit im Vergleich zu Glasmikrohohlkugeln aufgrund ihrer größeren Wandstärke - bedingt durch die 5 µm dicke CaCO₃ Beschichtung - auf.
- Die elektrische Durchschlagfestigkeit ist vom Mikrohohlkugelfüllgrad unabhängig. Der Effekt wird über den Durchschlagprozess in syntaktischem Schaum erklärt, der von Gasentladungen innerhalb der Mikrohohlkugeln initiiert wird.
- Zusätzlich eingebrachte Quarzmehlpartikel haben auf die elektrische Durchschlagfestigkeit keinen Einfluss.
- Die Durchschlagsfeldstärke von mit Glasmikrohohlkugeln gefülltem syntaktischem Schaum ist beim Abkühlen auf Kryotemperatur nahezu temperaturunabhängig, während die elektrische Festigkeit von kunststoffmikrohohlkugelgefülltem syntaktischem Schaum für alle Füllgrade sinkt.

Die erzielten Ergebnisse zeigen die elektrische Festigkeit einer großen Bandbreite von syntaktischen Schäumen und stellen für die Auslegung als Isolierstoff für hochspannungstechnische Anlagen einen wichtigen Baustein dar. Als wichtigstes Ergeb-

nis kann festgehalten werden, dass der Füllgrad des Füllstoffes auf die elektrische Festigkeit unter Kurzzeitwechselfeldbelastung keinen signifikanten Einfluss hat. Demzufolge ist es möglich, epoxidharzbasierte syntaktische Schäume nach anderen Kriterien, wie zum Beispiel mechanischen oder thermischen Eigenschaften, zu dimensionieren.

Um syntaktischen Schaum für verschiedene Anwendungen auszulegen, sind Kenntnisse über den Einfluss der Füllstoffe auf die mechanischen und thermischen Eigenschaften notwendig. Daher sind weitere Untersuchungen zu diesen Parametern geplant. Das Ziel weitergehender Untersuchungen ist die individuelle Einstellung der Materialeigenschaften für jeden Anwendungsfall, um eine bestmögliche Isolierung bei gleichzeitig geringen Kosten und einer hohen Zuverlässigkeit zu gewährleisten.

Literatur

- [1] A. Strauchs et al.: The Impact of Electrical Field Stress on the Volume Conductivity of Syntactic Foam, IEEE ISEI 2010, June 2010, San Diego, USA
- [2] A. Mashkin et al.: Investigation on Inverse Volume Effect of Syntactic Foam under Uniform dc Field Stress, IEEE ISEI 2010, June 2010, San Diego, USA
- [3] M. Kessler; C. Roggendorf; A. Schnettler: Behavior of elastic syntactic foams under impulse voltage stress, IEEE ISEI 2010, June 2010, San Diego, USA
- [4] IEC 60243-1: Electrical strength of insulating materials - Test methods - Part 1: Tests at power frequencies, German version EN 60243-1: 1998.

[5] A. Troeger: Analyse der elektrischen Durchschlagmechanismen in syntaktischen Schäumen, Dissertation, RWTH Aachen, 2009.

[6] H.D. Baehr, S. Kabelac: Thermodynamik, 14. Edition, Springer-Verlag Hamburg, 2009.

Kontakt

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

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

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

Neue Verfahren zur Bestimmung des Vernetzungsgrades polymerer Isolierstoffe mittels Ultraschall

Bei Mittelspannungskabeln, an die hohe Anforderungen bezüglich mechanischer Stabilität und Temperaturfestigkeit gestellt werden, beispielsweise im Bergbau oder bei Windenergieanlagen, haben sich als Hochspannungsisolierstoff anstelle von vernetztem Polyethylen (VPE) vernetzte Gummiwerkstoffe bewährt. Deren Vernetzungsgrad wird gewöhnlich nach Abschluss der Produktion anhand von Zugversuchen an Materialproben bestimmt. Hier kann durch eine Online-Überwachung des Vernetzungsgrades während des Produktionsvorgangs die Möglichkeit eröffnet werden, bei Sollwertverletzung direkt in die Produktion einzugreifen, um eine hohe Produktqualität zu gewährleisten. Ein neuer Ansatz bedient sich der Ultraschalldiagnostik, die eine kontaktlose Messung ermöglicht. Im ersten Schritt wird an Materialmustern aus Ethylen-Propylen-Dien-Monomer (EPDM) untersucht, welchen Einfluss der Grad der Vernetzung auf die akustischen Materialeigenschaften hat. Hierzu werden Materialproben mit einer typischen Isolierstoffdicke für unterschiedliche Zeitperioden vernetzt. Mit Hilfe der Durchschallungsmethode werden die akustischen Materialparameter bestimmt. Es wird eine Auswertung im Frequenzbereich vorgenommen, um gleichzeitig die Frequenzabhängigkeit der Dämpfung zu untersuchen. Die Ergebnisse zeigen bei 30°C eine gute Korrelation zwischen Vernetzungsgrad und akustischer Schalldämpfung, die auf den Ultraschallimpuls einwirkt. Somit kann die Ultraschalltechnik für eine kontaktlose und zerstörungsfreie Bestimmung der mechanischen Materialeigenschaften des Isolierstoffes eingesetzt werden.

Einleitung und Motivation

Spezielle Kabelanwendungen, wie beispielsweise der Einsatz im Bergbau, erfordern hoch flexible und temperaturbeständige Kabel. Häufig kommt hier vernetztes EPDM zum Einsatz [1]. Der Extrusions- und Vulkanisationsprozess erfolgt für gewöhnlich in einer kontinuierlichen Vernetzungslinie (engl. continuous vulcanization line). Das dreilagige Isoliersystem wird auf den Leiter extrudiert. Diese Kabelader wird unter hohem Druck und bei hoher Temperatur vernetzt und am Ende der Vernetzungslinie in einem Wasserbad gekühlt. Zur Bestimmung der mechanischen Materialeigenschaften werden Proben aus den ersten Metern des Kabels entnommen und an diesen die Zugfestigkeit TS (engl. tensile

strength) und die Dehnfähigkeit EB (engl. elongation at break) bestimmt. Die Ergebnisse werden mit den geforderten Spezifikationen des Kabels verglichen.

Ein neuer Ansatz für eine zerstörungsfreie Bestimmung des Vernetzungsgrades mit Hilfe von Ultraschall wird untersucht.

Schallausbreitung

Die Ultraschalldiagnostik nutzt die Interaktion von Schallwellen mit dem zu untersuchenden Material. Für eine zerstörungsfreie Materialprüfung können verschiedene akustische Materialeigenschaften untersucht werden, wie z.B. die Schallgeschwindigkeit, das Reflexionsverhalten oder die materialspezifische Schalldämpf-

fung, die eine Schallwelle beim Durchlaufen des Materials erfährt.

Im Allgemeinen generiert ein Ultraschallprüfkopf einen Schallimpuls mit der Schalldruckamplitude p_0 und der Mittenfrequenz f_m . Wenn ein Schallimpuls auf einen Prüfkopf trifft, so wandelt dieser den empfangenen Schalldruck in ein Spannungssignal um, vgl. Abb. 1.

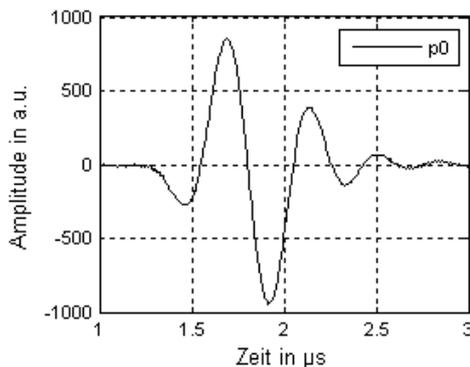


Abb. 1: Zeitsignal (A-Scan) eines Ultraschallimpulses

Durch eine Transformation in den Frequenzbereich lässt sich die spektrale Zusammensetzung des Signals veranschaulichen, vgl. Abb. 2.

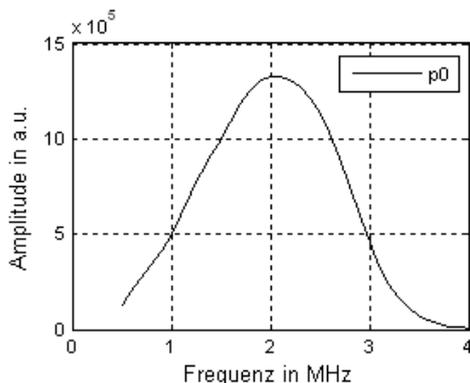


Abb. 2: Frequenzspektrum eines Ultraschallimpulses mit einer Mittenfrequenz von 2 MHz

Innerhalb homogener Materialien breitet sich ein Schallimpuls mit der materialspezifischen Ausbreitungsgeschwindigkeit c_m aus. Die akustische Impedanz Z_m eines

Mediums wird durch die Dichte ρ_m und die Schallgeschwindigkeit c_m bestimmt. Da die Schallgeschwindigkeit temperaturabhängig ist, unterliegt die Schallimpedanz Z_m ebenfalls dieser Abhängigkeit [2]:

$$Z_m(f, T) = \rho(T)c_m(T)$$

An Materialgrenzen mit verschiedenen Schallimpedanzen Z_1 und Z_2 kommt es zu Reflexions- und Transmissionsphänomenen. Die beschreibenden Koeffizienten sind durch die spezifischen Schallimpedanzen der jeweiligen Materialien gegeben [2]:

$$Re = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad Tr = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

Schalldämpfung

Während der Ausbreitung von Schallimpulsen in einem homogenen Material erfährt diese eine exponentielle Dämpfung ihrer Amplitude über den zurückgelegten Weg. Dieser Effekt wird durch mechanische Reibungsverluste verursacht und ist sowohl temperatur- als auch frequenzabhängig. Die materialspezifische Schalldämpfung kann mit Hilfe des Dämpfungskoeffizienten $\alpha(T, f)$ beschrieben werden. Die resultierende Schalldruckamplitude p kann für einen bestimmten Ort s wie folgt angegeben werden [2][3]:

$$p(s, f, T) = p_0 \cdot e^{-\alpha(f, T)s}$$

Bestimmung des Vernetzungsgrades

Erste Untersuchungen werden an laborgefertigten Plattenprüflinge auf EPDM Basis durchgeführt. Diese wurden bei 200°C unterschiedlich lange vernetzt. Da in der Kabelindustrie als mechanische Kennwerte die Zugfestigkeit und die Dehnfähigkeit verwendet werden, werden diese Materialparameter ebenfalls für die Materialproben bestimmt.

Die Ergebnisse der mechanischen Untersuchungen sind in Tabelle 1 dargestellt [5].

Vernetzungszeit in min	Zugfestigkeit in N/mm ²	Dehnfähigkeit in %
0	4,5	912
2	6,05	695
4	8,15	517
8	8,6	419

Tab. 1: Ergebnisse der mechanischen Untersuchungen [5]

Die Ergebnisse der mechanischen Materialparameter dienen als Referenz für die Ergebnisse der Ultraschallmessungen, um diese neue Messmethode verifizieren zu können.

Untersuchungen

Die Ultraschall-Tauchtechnik nutzt eine definierte Vorlaufstrecke in einem Koppelmedium (hier: Wasser), um die Schallimpulse in den Prüfling einzukoppeln. Die Ultraschallmessungen werden mit zwei baugleichen Prüfköpfen mit einer Mittenfrequenz von 2 MHz durchgeführt. Dabei wird ein Prüfkopf als Sender und der Andere als Empfänger eingesetzt. Um den Einfluss der Temperatur untersuchen zu können, ist das Wasserbad mit einem Thermostaten ausgerüstet, der eine Variation der Temperatur erlaubt. Abbildung 3 zeigt den experimentellen Aufbau.

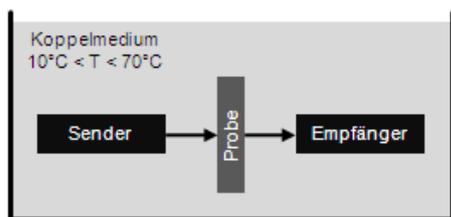


Abb. 3: Experimenteller Aufbau zur Bestimmung der akustischen Materialparameter

Das empfangene Zeitsignal wird für jede eingebrachte Materialprobe zusammen mit einem Referenzsignal (ohne Materialprobe) aufgezeichnet.

Bestimmung des Dämpfungskoeffizienten

Der Dämpfungskoeffizient kann wie folgt bestimmt werden[4]:

$$\alpha(f, T) = -\ln\left(\frac{p_{mess}}{p_0}\right) \cdot s^{-1}$$

Hierbei ist s die jeweilige Dicke des eingebrachten Prüflings. Die aufgenommenen Zeitsignale werden mit Hilfe der diskreten Fourier Transformation in dem Frequenzbereich überführt. Abbildung 4 zeigt den Einfluss der Schalldämpfung durch die eingebrachte Materialprobe. Sowohl die Amplitude des Schalldrucks als auch die Mittenfrequenz sinken, wodurch die Frequenzabhängigkeit des Dämpfungsfaktors nachgewiesen wird.

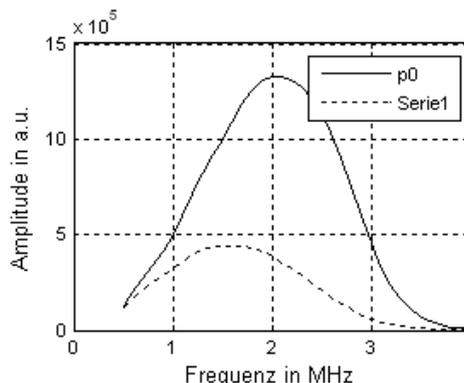


Abb. 4: Spektrum des Zeitsignals: p_0 ohne Materialprobe, Serie 1 unvernetztes EPDM

Ergebnisse

Der Dämpfungskoeffizient α steigt linear mit steigender Frequenz. Gleichzeitig zeigen Untersuchungen eine starke Abhängigkeit von der Temperatur [5]. Durch eine Normierung der Dämpfungskoeffizienten der vernetzten Proben relativ zum unvernetzten Material lässt sich ein relativer Dämpfungskoeffizient bestimmen, der in Abbildung 5 dargestellt ist.

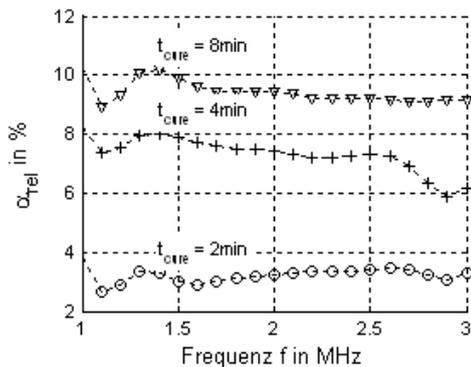


Abb. 5: Relativer Dämpfungskoeffizient für verschiedene Vernetzungszeiten

In Abbildung 6 ist eine gute Übereinstimmung der Zugfestigkeit und der per Ultraschallverfahren ermittelten Dämpfungseigenschaften zu erkennen.

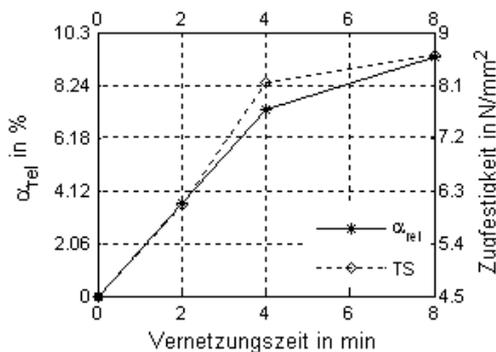


Abb. 6: Normierter Dämpfungskoeffizient und Zugfestigkeit für verschiedene Vernetzungszeiten

Durch den Vergleich des Dämpfungskoeffizienten bei unterschiedlichem Vernetzungsgrad kann ein Zusammenhang zwischen den betrachteten mechanischen Materialparametern und dem relativen Dämpfungskoeffizienten hergestellt werden. Auf Basis dieser positiven Ergebnisse ist die Verwendung der Ultraschalltechnik für ein industrielles Online-Messverfahren denkbar.

Quellen

- [1] C. Cornelissen: "Materials and test methods for power cables exposed to heavy operating conditions", Jicable11
- [2] J. Krautkrämer und H. Krautkrämer: Werkstoffprüfung mit Ultraschall, Springer Verlag, Berlin 1986, 5.Aufl.
- [3] J. Kirchhoff and D. Mewes: "Measuring the State of Cure of Elastomers by using an Ultrasonic Technique", KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe 55. Jahrgang, Nr. 7-8/2002
- [4] Mc Hugh, J., Döring, J., Stark, W.: "Relationship between the mechanical and the ultrasound properties of polymer materials", ECNDT 2006
- [5] Knauel, J., Brammer, G., Schnettler, A., Cornelissen, C.: "Detection of state of cure of EPDM in medium voltage cables using ultrasound diagnosis", XVIIth ISH, Hannover, Germany 2011

Danksagung

Ein besonderer Dank gilt Nexans Mönchengladbach für die Bereitstellung der Materialmuster und die Durchführung der mechanischen Untersuchungen.

Kontakt

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

Dipl.-Ing. Jens Knauel
knauel@ifht.rwth-aachen.de
+49 (241) 80-97346

Untersuchungen zur Dielektrik alternativer Füllgase in gasisolierten Schaltanlagen

Einen Forschungsschwerpunkt im Bereich Netztechnik stellt die Reduktion bzw. Substitution des Treibhausgases Schwefelhexafluorid (SF_6), das heute als Isolier- und Löschgas in Betriebsmitteln der elektrischen Energieversorgung eingesetzt wird, dar. Hierbei führt die reduzierte dielektrische Festigkeit möglicher SF_6 -Substitute wie zum Beispiel Kohlenstoffdioxid (CO_2) oder Luft zu neuen Herausforderungen an das Design der Betriebsmittel sowohl in Bezug auf die Isolationskoordination als auch in Bezug auf das Abschalten hoher Kurzschlussströme. Aktuelle Forschungen am Institut für Hochspannungstechnik untersuchen die Möglichkeit der Erhöhung der dielektrischen Festigkeit von CO_2 durch Beimischung von Sauerstoff (O_2).

Einleitung

SF_6 (Schwefelhexafluorid) wird aufgrund seiner hervorragenden Eigenschaften als Isolier- und Löschgas in gasisolierten Schaltanlagen (GIS) und Leistungsschaltern, aber auch in Wandlern und Transformatoren eingesetzt. Hierzu zählen vor allem seine hohe dielektrische Festigkeit und seine schnelle thermische Rekombination. Diesen Eigenschaften steht sein hohes Global Warming Potential von 22800 CO_2 (Kohlenstoffdioxid) Massenäquivalenten gegenüber. Ein SF_6 -Verbot konnte bis jetzt zwar durch eine Selbstverpflichtung der Industrie zur Reduktion der SF_6 -Leckraten vermieden werden, dennoch werden die SF_6 -Emissionen trotz der Anstrengungen im Bereich der Energieübertragung und Verteilung weiter ansteigen [1]. Diese Entwicklungen stellen Hersteller und Anlagenbetreiber vor die Herausforderung, die SF_6 -Emissionen über die gesamte Lebensdauer ihrer Betriebsmittel weiter zu reduzieren. Eine vielversprechende Alternative ist hierbei der Einsatz alternativer Isolier- und Löschgase für GIS und Leistungsschalter, sofern deren Zuverlässigkeit gewährleistet ist. Aktuelle Untersuchungen befassen sich zum Beispiel mit der Erhöhung der dielektrischen Festigkeit durch

Beschichtung der Innenleiter einer GIS. Im Fokus der Untersuchungen möglicher SF_6 -Substitute stehen die ungiftigen Gase Luft und CO_2 , die jedoch eine gegenüber SF_6 deutlich reduzierte dielektrische Festigkeit aufweisen. Des Weiteren haben vorhergehende Forschungsarbeiten gezeigt, dass die dielektrische Festigkeit unter Anwesenheit von Metallpartikeln deutlich reduziert wird [2]. Außerdem gibt es Ansätze die Durchschlagsfestigkeit möglicher SF_6 -Substitute durch Beimischung weiterer Gase, beispielsweise Sauerstoff, zu erhöhen. Die Untersuchungen werden dabei zumeist in vereinfachten Spitze-Platte-Anordnungen durchgeführt [3].

Versuchsordnung

Ziel der hier vorgestellten Untersuchungen ist die Evaluierung von Verbesserungspotentialen der dielektrischen Festigkeit von CO_2 mit Partikelstörung durch Beimischung eines weiteren Gases. Die Ergebnisse dienen hierbei als Grundlage für die Isolationskoordination einer SF_6 -freien Schaltanlage. Hierbei wurde die in Abbildung 1 dargestellte Anordnung verwendet, die den Abmessungen einer realen gasisolierten Schaltanlage nachempfunden ist [4, 5]. Die Nachbildung der Partikelstörung

erfolgt dabei durch eine Nadel, die auf der Erdelektrode aufgebracht wird (siehe Abbildung 2).

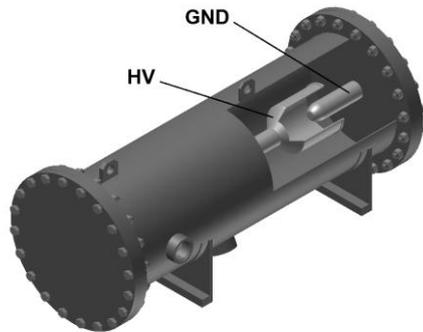


Abb. 1: Versuchsgefäß



Abb. 2: Nadelelektrode zur Nachbildung einer Partikelstörung

Die Prüfanordnung wird mit einer Blitzstoßspannung (1,2/50) konstanter Amplitude belastet und so für verschiedene Gasgemische die Durchschlagsspannung aufgezeichnet. Die Untersuchungen werden bei einem Fülldruck von 1 bar durchgeführt.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen sind in Abbildung 3 dargestellt. Im Diagramm sind die Mittelwerte der gemessenen Durchschlagsspannungen sowie die 95% Konfidenzintervalle eingezeichnet. Für eine positive Spitze bzw. Nadelelektrode wird sowohl für CO₂ als auch für die CO₂-O₂-Gemische – in Übereinstimmung mit den bestehenden Durchschlagmodellen – eine niedrigere Durchschlagsspannung beobachtet als für eine

negative Spitze. Entscheidend für das Design des Betriebsmittels ist die Spannungsbelastung bei positiver Spitze. Durch die Beimischung von 20% O₂ kann die dielektrische Festigkeit von CO₂ um ca. 10% erhöht werden. Da es sich bei Sauerstoff um ein brandförderndes Gas handelt wurde der Untersuchungsrahmen auf einen maximalen Anteil von 20% an der zu untersuchenden Gasmischung begrenzt.

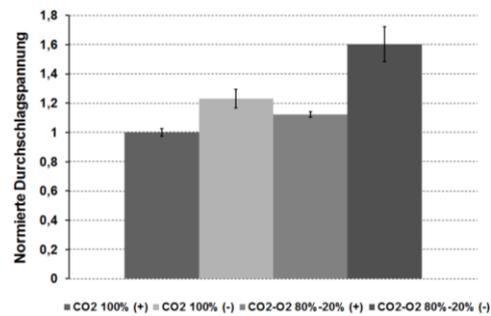


Abb. 3: Polaritätseffekt und Einfluss der Beimischung von 20% Sauerstoff auf die dielektrische Festigkeit von CO₂

Eine Variation des Sauerstoffanteils im Bereich von 0% bis 20% zeigt eine optimale dielektrische Festigkeit des Gasgemisches bei einem Sauerstoffanteil von 15% (siehe Abbildung 4).

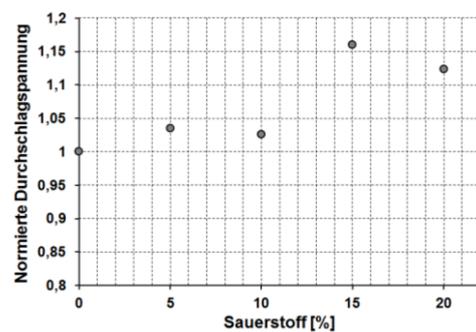


Abb. 4: Einfluss des Sauerstoff-Anteils

Des Weiteren zeigen die Messungen der Durchschlagsspannung des CO₂-O₂-Gemisches mit 20% Sauerstoff eine erhöhte Streuung der Durchschlagsspannungen. In Ergänzung zu den Messergebnissen ist in Abbildung 5 beispielhaft ein Resultat zu-

sätzlich mit einer Hochgeschwindigkeitskamera durchgeführter Aufnahmen dargestellt. Es ist die Ausbildung zweier Durchschlagskanäle zu erkennen, die an der positiven geladenen Nadelelektrode zusammenlaufen.



Abb. 5: Aufnahme des Durchschlagspfads

Zusammenfassung & Ausblick

Die hier vorgestellten Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Erhöhung der dielektrischen Festigkeit von Kohlenstoffdioxid durch die Beimischung von Sauerstoff möglich ist. Die niedrigeren Durchschlagswerte wurden jeweils bei positiver Spitze beobachtet und sind damit bestimmend für die Auslegung des Betriebsmittels. Die Untersuchungen wurden zunächst bei einem absoluten Fülldruck von 1 bar durchgeführt. Weiterführende Untersuchungen sollten deshalb eine Variation des Fülldrucks zum Ziel haben. Zusätzlich sollte die Steilheit der Prüfspannung variiert werden, um auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse ein physikalisches Modell des Durchschlagsprozesses zu entwickeln. Hierbei müssen neben dem Streamerkriterium auch Entladeverzug und Funkenaufbauzeit berücksichtigt werden.

Quellen

- [1] W. Schwarz: Emissionen fluorierter Treibhausgase in Deutschland 2008 – Inventarermittlung der F-Gase 2008 – Daten von HFKW, FKW und SF₆ für die nationale Emissionsberichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention für das

Berichtsjahr 2008. Umweltbundesamt, 2010

- [2] H. Rebholz, W. Köhler, S. Tenbohlen, S.: Dielektrische Festigkeit verschiedener Gas in GIS. VDE Fachtagung – Grenzflächen in el. Isoliersystemen, 2005
- [3] N. Koshino, Y. Yoshitake, N. Hyakawa, H. Okubo: Partial discharge and breakdown characteristics of CO₂-based gas mixtures as SF₆ substitutes. Gaseous Dielectrics X, 2004
- [4] S. Tenbohlen: Der Einfluß dielektrischer Oberflächen auf die Durchschlagsentwicklung in einer störstellenbehafteten SF₆ - Anordnung. Dissertation, RWTH Aachen, 1997
- [5] G. Schröder: Entladungsentwicklung in SF₆-N₂ Gasgemischen bei schnell schwingenden Steilstoßspannungen und Blitzstoßspannung. Dissertation, RWTH Aachen, 2001

Kontakt

Dipl.-Ing. Gregor Nikolic
nikolic@ifht.rwth-aachen.de
+49 (241) 80-93042

Berechnung von Online Monitoring Daten mittels künstlicher neuronaler Netze

Leistungstransformatoren stellen ein wichtiges und kostenintensives Betriebsmittel in der Elektrizitätsversorgung dar. Einzelne Komponenten wie Stufenschalter, Isolierung oder Kühlsystem werden deshalb mittels (Online-) Monitoring-Systemen überwacht. Auf der Grundlage von aufgezeichneten Datensätzen soll in diesem Artikel eine mögliche Grundlage für eine Analysemethode von Leistungstransformatoren vorgestellt werden. Diese basiert auf dem Einsatz Künstlicher Neuronaler Netze (KNN), welche sich bereits in vielfältigen Anwendungsbereichen als ein Tool der nicht-linearen Modellbildung etabliert haben. Ziel dieser Untersuchung ist es künstliche neuronale Netze zu identifizieren, welche anhand aktueller Messwerte eines Monitoring-Systems andere Messgrößen prognostizieren können.

Künstliche neuronale Netze

Inspiziert von der Struktur der Neuronen und Synapsen des menschlichen Gehirns und deren Leistungs- und Lernfähigkeit, entstammt die Idee der KNN der Biologie. Um diese Fähigkeiten adaptieren zu können, werden die biologischen Strukturen in der Informatik als gerichtete Graphen implementiert. Künstliche Neuronale Netze können dann auf bestimmte Systemsituationen bzw. Problemstellungen hin trainiert werden (lernen) und erreichen so eine Adaptionfähigkeit für das gegebene dynamische, nicht-lineare System.

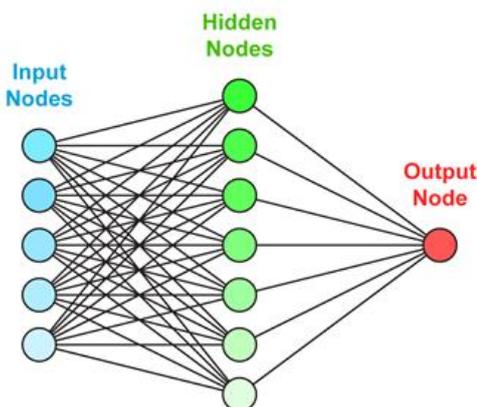


Abb. 1: Schema eines Künstlichen Neuronalen Netzes

Die Aktivierung eines Neurons ist aufgeteilt in drei Funktionen, die jedes Mal durchlaufen werden, wenn ein Neuron ein Eingangssignal (Input) erhält. Zunächst

wird durch die Propagierungsfunktion der Nettoinput für das aktuelle Neuron j berechnet, in der einfachsten Form die Summe aller Ausgangssignale o_i der vorherigen Neuronen multipliziert mit den entsprechenden Kantengewichten w_{ij}

$$net_j = \sum o_i w_{ij}$$

Anschließend wird in der Aktivierungsfunktion aus dem Nettoinput ein neuer Aktivierungswert $a_j = F_j(net_j)$ des Neurons j berechnet. Neben linearen Funktionen werden dabei auch sigmoide Funktionen, wie die logistische oder die Tangens-Hyperbolicus-Funktion verwendet.

$$a_j = \frac{1}{1 + \exp(-net_j/T)} \text{ oder } a_j = \tanh(net_j)$$

Schließlich wird in der Output-Funktion a_j aus der neuen Aktivierung die Ausgabe o_j für die nachfolgende Schicht erzeugt. Zumeist wird hier lediglich die Identität, die ggf. noch entsprechend skaliert werden kann (Faktor k), benutzt [1, 2].

$$o_j = k a_j$$

Weiterer zentraler Bestandteil in der Theorie der Künstlichen Neuronale Netze ist die Modellierung und Implementierung des Lernens. Dies beruht auf biologischen Lernprozessen, bei denen eine Synapse gestärkt wird, wenn das zweite Neuron

wiederholt Eingangssignale vom ersten Neuron erhält und beide Zellen stark aktiviert sind. Genauso kann die Verbindung auch abgeschwächt werden, wenn die Aktivierung ausbleibt. Innerhalb des Lernens in KNN wird ein Trainingsvektor als Input an das Netz angelegt. Der sich ergebende Ausgangsvektor wird mit einem Zielvektor, der zu dem Trainingsvektor die korrespondierenden erwünschten Ausgangswerte enthält, verglichen. Für ein erfolgreiches Trainieren des Künstlichen Neuronalen Netzes ist es notwendig, die minimale Abweichung zu finden. Dazu werden die Kantengewichte mittels des Gradientenabstiegs-Verfahrens korrigiert.

Modellierung der KNN

Die vorliegenden Datensätze beinhalten aufgezeichnete Monitoringparameter von insgesamt acht Leistungstransformatoren unterschiedlicher Leistungsklassen, Baujahre, Kühlsysteme sowie Typen (Einphasig, Dreiphasig). Das Monitoring-System eines jeden dieser Transformatoren zeichnet über 100 verschiedene Messgrößen auf. Generell gilt es herauszufinden, welche der verfügbaren Größen benutzt werden können, um ein stark konvergierendes Neuronales Netz zu erhalten. Als Outputgröße wird vorerst auf Grund ihrer Aussagekraft die Top-Oil-Temperatur (TOT) betrachtet. Als Inputgrößen des KNN kommen dabei solche Monitoringgrößen in Frage, die in direktem physikalischem Zusammenhang mit der TOT stehen (siehe Abb. 2). Als Basis-Inputs werden zunächst fünf Messgrößen festgelegt, welche die Basis für alle weiteren betrachteten Topologien bilden. Dies sind bspw. Umgebungstemperatur, Phasenstrom und Lastfaktor. Um den Einfluss auf die Prognosefähigkeit durch Hinzunahme weiterer Inputs analysieren zu können, werden der Betriebszustand der Pumpen / Lüfter sowie Messwerte der Öltemperaturen aus der vorherigen Betriebsstunde ggf. zusätzlich eingebunden.

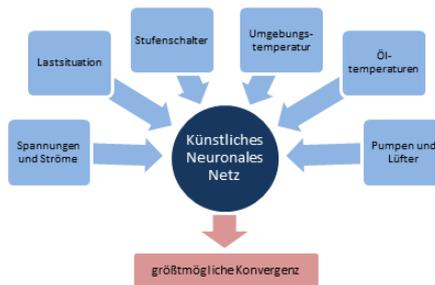


Abb. 2: Wahl der Ein- und Ausgangsparameter

Des Weiteren werden die neuronalen Netze innerhalb ihres strukturellen Aufbaus variiert. Dabei wird zunächst für jede der Topologien die Neuronen-Anzahl auf dem ersten Hidden Layer aufsteigend von 6 bis 30 untersucht. Bei Hinzunahme eines zweiten Hidden Layer wird dieser mit Konfigurationen aufsteigend von 3 bis 15 Neuronen erprobt. Um eine breite Anwendbarkeit der KNN zu gewährleisten, wurden diese auf Basis aller vorliegenden Leistungstransformatoren trainiert. Die Datensätze wurden dazu bereinigt und angepasst.

Ergebnisse

Zunächst wird die Prognosefähigkeit der neuronalen Netze mittels des Mean-Square-Errors (MSE) verglichen. Werden die Basis-Inputs und der prozentuale Betriebszustand der Lüfter als Netz-Input verwendet, liegt der MSE der Netze ab 18 Neuronen auf dem Hidden Layer größtenteils unter 5 (siehe Abb. 3).

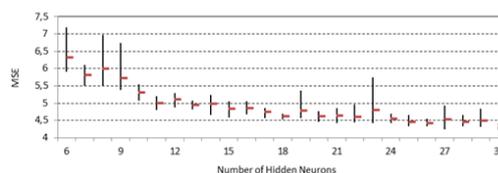


Abb. 3: MSE, 1 Layer Topologie inkl. Lüftern

Bei Hinzunahme der historischen Temperaturverläufe als Input liegt die Performance der Topologien mit 1 Hidden Layer bereits größtenteils unter einem MSE von 0,6 (siehe Abb. 4).

he Abb. 4). Dies zeigt die deutlich verbesserte Prognosegenauigkeit durch die Hinzunahme der historischen TOT Werte als Eingangsgröße.

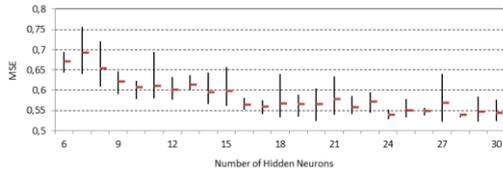


Abb. 4: MSE, 1 Layer Topologie inkl. historischer Temperaturen

Die trainierten Neuronalen Netze werden anschließend verwendet, um den Temperaturverlauf der TOT zu simulieren und diese dann mit den tatsächlich gemessenen Werten verglichen. Es ist zu erkennen, dass die TOT bei Einsatz der Topologie mit historischen Temperaturwerten als Eingangsparameter sehr gut prognostiziert wird. Allerdings ist auch ersichtlich, dass die vom KNN ausgegebene TOT der tatsächlich gemessenen Temperatur naheilt. Die Verzögerung entspricht dabei in etwa genau der gewählten Zeitdifferenz der historischen Temperaturwerte (Abb. 5).

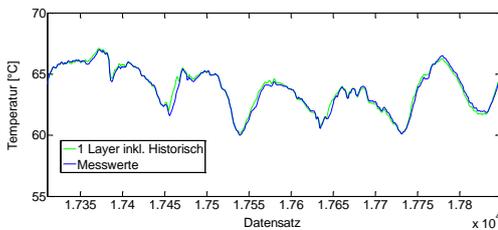


Abb. 5: Anwendung der besten 1 Layer Topologie mit historischen Temperaturen

Die Topologie mit Basis-Daten und Betriebszuständen der Kühler als Input liefert die besten Ergebnisse ohne Hinzunahme historischer Temperaturverläufe. Bei Verwendung einschichtiger KNN liegt der Betrag des maximalen absoluten Fehlers, bis auf einige wenige Ausnahmen, im Bereich von $\pm 10^{\circ}\text{C}$. Die mittlere Abweichung liegt bei $2,34^{\circ}\text{C}$ mit einer Standardabwei-

chung von $\pm 2,13^{\circ}\text{C}$. Durch Einsatz von KNN mit 2 Layern können die Abweichungen sogar im Mittelwert auf $2,04^{\circ}\text{C}$ und in der Standardabweichung auf $\pm 1,85^{\circ}\text{C}$ reduziert werden (Abb. 6).

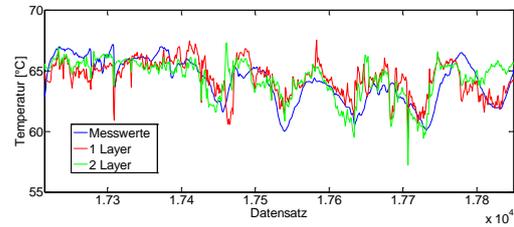


Abb. 6: Vergleich der besten 1 und 2 Layer Topologien mit Lüftern

Zusammenfassung

Die Auswertung aller im Rahmen dieser Untersuchung trainierten Topologien der KNN ergab, dass sich KNN generell zur kurzfristigen Prognose der TOT eignen. Dabei liefern Topologien mit einem Hidden Layer bereits genaue Prognosewerte mit einer durchschnittlichen Abweichung von $2,34^{\circ}\text{C}$. Werden die Neuronalen Netze um einen zweiten Hidden Layer erweitert so verbessert sich die Prognosegüte.

Quellen

- [1] U. Lämmel, J. Cleve: Künstliche Intelligenz. Carl Hanser Verlag, 3. Auflage, München 2008.
- [2] J. Schmidt, C. Klüver, j. Klüver: Programmierung naturanaloger Verfahren. Vieweg+Teubner Verlag, 1. Auflage, Wiesbaden 2010.

Danksagung

Ein besonderer Dank gilt der ALSTOM Grid GmbH und Ihren Mitarbeitern aus Mönchengladbach für die gute Kooperation und Bereitstellung von Datensätzen zu Auswertungszwecken.

Kontakt

Dipl.-Ing. Michael Peitz
 peitz@ifht.rwth-aachen.de
 +49 (241) 80-49331

Technische und ökonomische Bewertung von Mittelspannungs-Gleichstromnetzen für Eigenbedarfssysteme in Kraftwerken

In Industrieanlagen wie auch in Kraftwerken ist die zuverlässige Versorgung mit elektrischer Energie für die Produktionsprozesse fundamental. Im Hinblick auf das Eigenbedarfssystemen von Kraftwerken stellt dessen Mittelspannungsverteilungsnetz das tragende Element dar. Folglich kommt einem zuverlässigen und dennoch kostengünstigen Mittelspannungsnetzaufbau eine hohe Bedeutung im industriellen Verteilungsnetz zu. Es wird untersucht, ob das Eigenbedarfssystem eines Kraftwerks auf Grundlage eines Mittelspannungs-Gleichstrom-Netzes als gleichwertige oder gar vorteilhafte Alternative zum konventionellen Verteilungsnetz angesehen werden kann. Entscheidend sind hierbei die gegebenen Randbedingungen und die Einbeziehung technisch-ökonomischer Aspekte.

Einleitung und Motivation

Die Mittelspannungs-Gleichstrom-Technologie (MVDC) hat sich für großtechnische Anwendungen bisher ausschließlich im Bereich der Versorgung elektrischer Bahnen etabliert. Dabei kann sie sich potentiell auch in industriellen Verteilungsnetzen, wie z. B. dem elektrischen Eigenbedarfssystem (EBS) von Kraftwerken, als vorteilhaft erweisen. In derartigen Anlagen werden erhöhte Anforderungen an die Versorgungszuverlässigkeit gestellt [1]. Zudem weisen EBS einen hohen Anteil an Umrichter gespeisten Großantrieben auf, für deren Versorgung sich das Konzept eines MVDC-Netzes anbietet [2]. In diesem werden die Verbraucher über zentrale Gleichrichter und einen gemeinsamen DC-Bus mit elektrischer Energie versorgt [3]. Bei den Gleichrichtern können sich dadurch auf Grund des Skalierungseffektes ökonomische Vorteile ergeben.

Anhand einer konkreten Versorgungsaufgabe in Form einer Müllverbrennungsanlage soll das Potential von MVDC-Netzen für den Einsatz in industriellen Verteilungsnetzen untersucht werden. Hierzu wird ein konventionelles Wechselspan-

nungssystem (MVAC), dargestellt in Abb. 1, mit MVDC-basierten Konzepten in zwei Varianten verglichen.

Methode und Netztopologien

Die Bewertung der Netze erfolgt unter ökonomischen und technischen Gesichtspunkten. Dabei bilden die Anschaffungskosten der Betriebsmittel die Grundlage der ökonomischen Betrachtung.

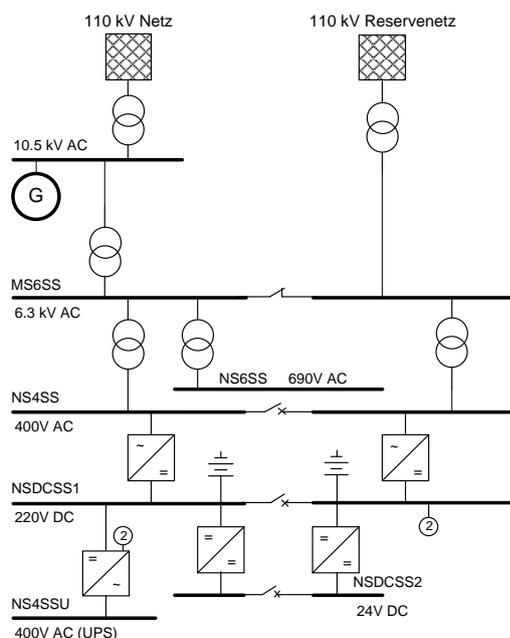


Abb. 1: Konventionelles MVAC-Netz

Auf technischer Ebene werden im Wesentlichen transiente Ereignisse, wie Kurzschlüsse auf den Mittel- und Niederspannungssammelschienen, simulatorisch analysiert. Die simulierten Spannungs- und Stromverläufe im stationären und transienten Netzbetrieb bilden die Kriterien für die technische Betrachtung. Hierzu werden zwei entwickelte Varianten eines DC-Verteilungsnetzes (DC-VN-A bzw. DC-VN-B) in der Software MATLAB simuliert und mit den Ergebnissen des konventionellen AC-Netzes (AC-VN) verglichen. Die Verteilung der Hauptverbraucher des EBS auf die jeweiligen Sammelschienen (SS) ist in Tabelle 1 angegeben.

Verbraucher	Spannungs-Ebene	Nennleistung	SS in AC-VN	SS in DC-VN-A	SS in DC-VN-B
Saugzug 1	6 kV AC	1300 kW	MV6SS	MVDCSS	MVDCSS
Saugzug 2	6 kV AC	600 kW	MV6SS	MVDCSS	MVDCSS
Speisewasserpumpe	690 V AC	250 kW	LV6SS	MVDCSS	MVDCSS
Primär-Gebläse	690 V AC	220 kW	LV6SS	MVDCSS	MVDCSS
Sekundär-Gebläse	690 V AC	190 kW	LV6SS	MVDCSS	MVDCSS
Asynchronmaschinen*	690 V AC	350 kW	LV6SS	MVDCSS	MVDCSS
Asynchronmaschinen*	400 V AC	900 kW	LV4SS	LV4SS	LV4SS
Restliche Verbraucher*	400 V AC	940 kW	LV4SS	LV4SS	LV4SS
Leittechnik*	220 V DC	40 kW	LVDCSS1	LVDCSS1	LVDCSS1
Leit- und Schutztechnik*	24 V DC	10 kW	LVDCSS2	LVDCSS2	LVDCSS2
Schutztechnik*	400V AC (UPS)	30 kW	LV4SSU	LV4SSU	LV4SSU

* Kumulierte Verbraucherleistung

Tab. 1: Hauptverbraucher im betrachteten Eigenbedarfssystem

Die frequenzeregelten Großverbraucher sind an der 6,3 kV Mittelspannungssammelschiene (MS6SS) und an der 690 V Niederspannungssammelschiene (NS6SS) angeschlossen. Die Niederspannungssammelschienen (NS4SS) versorgen die kleineren Verbraucher sowie das unterbrechungsfreie Netz (UPS). Die entwickelten DC-VN decken ebenfalls den Eigenbedarf der Anlage ab, wobei die großen frequenzeregelten Asynchronmotoren an ein multiterminales Mittelspannungs-Gleichstrom-netz (MSDCSS) mit einer Nennspannung von 5,4 kV angeschlossen sind.

Bei der ersten Netzvariante DC-VN-A (Abb. 2) sind ausschließlich die Großver-

braucher an die MSDCSS angebinden. Das Niederspannungsnetz wird nach wie vor aus dem AC-Netz versorgt. Die Versorgung der darunter liegenden Sammelschienen ist identisch mit der im AC-VN.

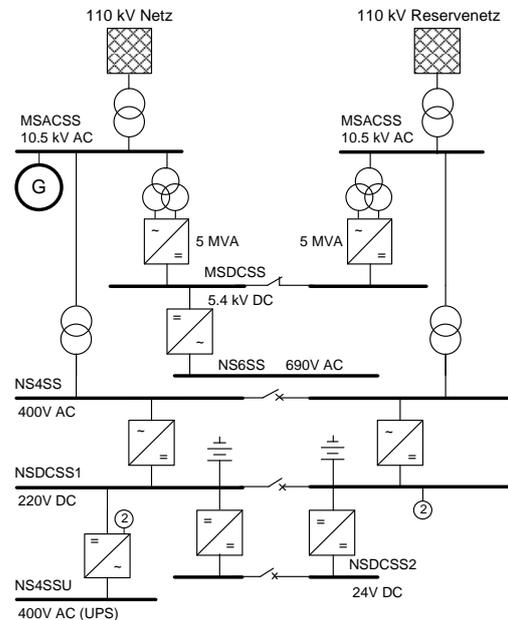


Abb. 2: Ausschnitt des DC-Verteilungsnetzes Variante DC-VN-A

In der zweiten Netzvariante DC-VN-B (Abb. 3) werden sowohl die Großverbrau-

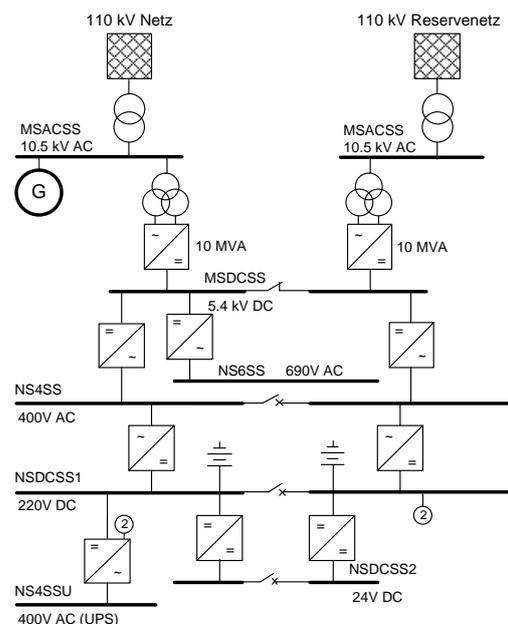


Abb. 3: Ausschnitt des DC-Verteilungsnetzes Variante DC-VN-B

cher als auch das gesamte Niederspannungsnetz aus dem MS-DC-Netz gespeist. Bei beiden Netzvarianten wird der redundante Netzaufbau beibehalten.

Ökonomische Analyse

Die ökonomische Analyse berücksichtigt nur die Investitionskosten für die Transformatoren, Wechselrichter, Gleichrichter und Kabelsysteme. Schutzsysteme und Schaltanlagen werden in die Betrachtung nicht einbezogen, da zu derartigen Komponenten für MVDC-Netze keine verlässlichen Anschaffungskosten bestimmt werden können. Da des Weiteren keine Betriebserfahrungen für MVDC-Netze in dieser Anwendung vorliegen, können die Betriebskosten nicht in die Betrachtung mit einbezogen werden. Die Unterschiede zwischen den Investitionskosten der drei betrachteten Netzvarianten sind signifikant. Die Kosten der konzipierten DC-Verteilungsnetze übersteigen die des konventionellen AC-Systems um 80 % bzw. 135 % (Abb. 4). Als Hauptgrund können die zusätzlichen Wechselrichter für die Großverbraucher, die an der Sammelschiene NS6SS angebunden sind, identifiziert werden. Die Mehrkosten sind auf die hohen Kosten für leistungselektronische Elemente zurückzuführen.

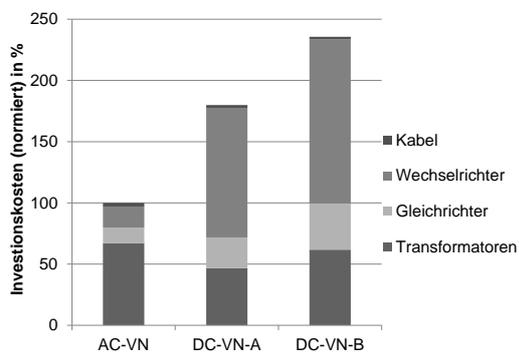


Abb. 4: Investitionskosten der unterschiedlichen Netzvarianten

Gleichzeitig fallen die Gesamtkosten für die Transformatoren in den DC-basierten

Systemen im Vergleich zum AC-VN geringer aus, da mehrere kleinere Transformatoren im AC-VN, die der Versorgung einzelner Frequenzumformer dienen, in den DC-VN durch größere, zentrale Transformatoren substituiert werden können.

Aus der Analyse geht ebenfalls hervor, dass Kabelkosten mit einem durchschnittlichen Anteil von 3 % keinen signifikanten Einfluss auf die Investitionskosten haben.

Technische Analyse

Im Rahmen der technischen Analyse wird das Netzverhalten im stationären und transienten Betrieb untersucht. Während sich im stationären Betrieb nur geringfügige Abweichungen im Hinblick auf die Spannungsqualität ergeben, sind die Unterschiede im Fehlerfall signifikant [3]. Beispielhaft wird hier das Verhalten bei einem dreipoligen Kurzschluss an der Sammelschiene NS4SS ausgehend von einem Nennbetriebsstrom von 3 kA untersucht.

Die Effektivwerte der Fehlerströme an der Sammelschiene NS4SS, die sich aus der Simulation der unterschiedlichen Netzvarianten ergeben, sind in Abb.5 dargestellt.

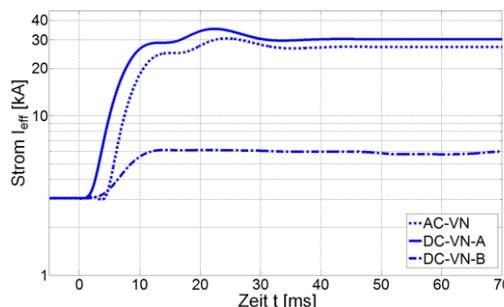


Abb. 5: Kurzschlussstromverläufe bei einem drei-poligen Kurzschluss auf NS4SS

Im DC-VN-A erreicht der Fehlerstrom den höchsten Wert von 35 kA, da der Kurzschluss direkt über den MS/NS-Transformator aus der 10,5 kV-Netzebene gespeist wird. Im AC-VN stellt sich ebenfalls ein hoher Fehlerstrom von 30 kA ein,

welcher ebenso maßgeblich durch die Kurzschlussleistung des speisenden Transformators beeinflusst wird. Beim DC-VN-B bewirkt die Speisung durch die Wechselrichter eine unmittelbare Begrenzung des Kurzschlussstroms auf 4,5 kA. Auf Grund der geringeren elektrischen und mechanischen Beanspruchung der NS-Betriebsmittel im Kurzschlussfall können sich für diese Variante technische Vorteile für die Versorgung von NS-Netzen aus einem übergelagerten DC-VN ergeben.

Zusammenfassung

Der ökonomische Vergleich der DC-basierten Konzepte für das Mittelspannungsverteilungsnetz im EBS eines Kraftwerks mit dem konventionellen AC-Netz zeigt, dass die neuen Konzepte sich derzeit wirtschaftlich noch nicht rentieren. Die Überlegenheit der AC-Technik wird sich jedoch mit der zu erwartenden sinkenden Preisentwicklung für Leistungs-Halbleiter-Bauelemente verringern. In technischer Hinsicht kann die MVDC-Technik zu einer Verbesserung des Systemverhaltens, insbesondere im Fehlerfall beitragen, da zum einen bei einer geeigneten Systemauslegung die auftretenden Kurzschlussströme durch die Umrichter begrenzt werden. Zum anderen reduzieren sich die Rückwirkungen auf andere fehlerfreie Netzteile, wodurch sich die Gesamtverfügbarkeit der Eigenbedarfssysteme verbessert [3].

Für den Betrieb der hier als Konzept vorgestellten MVDC-Netze werden allerdings entsprechende Schutz- und Schaltgeräte in Form von DC-Leistungsschaltern benötigt, die im Fall eines Fehlers im Bereich der MVDC-Sammelschiene eine sichere und zugleich selektive Abschaltung ermöglichen.

Aktuelle Forschungsarbeiten am IFHT beschäftigen sich daher mit der Bestimmung von technischen Anforderungen an DC-Leistungsschalter, deren Design sowie Möglichkeiten zum Testen und Prüfen dieser Komponenten.

Quellen

- [1] K. Albert, 1993, Elektrischer Eigenbedarf, Energietechnik in Kraftwerken und Industrie, VDE-Verlag, Berlin.
- [2] M. Baran, 2001, DC Distribution for Industrial Systems Opportunities and Challenges, IEEE trans. industry applications, vol. 39, pp. 1596-1601.
- [3] D. Eichhoff, A. Kurz, M. Hoffacker and A. Schnettler, Technical and Economical Assessment of an Industrial Medium Voltage Grid with DC Technology, MatPost2011, Lyon, France, 2011

Kontakt

Dipl. Wirt.-Ing. Alexander Gitis
 gitis@ifht.rwth-aachen.de
 +49 (0)241 80-49329

Dipl.-Ing. Daniel Eichhoff
 eichhoff@ifht.rwth-aachen.de
 +49 (0)241 80-97348

Anforderungen an intelligente autarke Ortsnetzstationen in zukünftigen Verteilungsnetzen

Durch einen unkoordinierten Anschluss von dezentralen Energiewandlungstechnologien und Elektrofahrzeugen an die Niederspannungsnetze entstehen neue Herausforderungen innerhalb der Verteilungsnetze. Eine Möglichkeit diesen zu begegnen stellen intelligente Ortsnetzstationen dar. Innerhalb dieses Artikels werden daher Modellierungen vorgestellt, mittels welcher die Einflussmöglichkeiten autarker intelligenter Ortsnetzstationen auf den Betrieb von Verteilungsnetzen sowie die Einflüsse auf die Verteilungstransformatoren ermittelt werden können. Die aus diese Untersuchung resultierenden Anforderungen an Ortsnetzstationen und ihre Komponenten in zukünftigen Verteilungsnetzen werden ebenso vorgestellt, wie eine Abschätzung des bis 2030 zu erwartenden Bedarfs spannungsgeregelter Ortsnetzstationen in deutschen Verteilungsnetzen.

Einleitung und Motivation

Durch die Zunahme dezentraler Energiewandlungseinheiten sowie das Einbinden neuer Verbrauchertypen, wie bspw. Elektrofahrzeuge, ist mit einer Vielzahl neuer Herausforderungen zu rechnen, wobei im Fokus der nachfolgenden Untersuchungen insbesondere die Auslastung von Ortsnetztransformatoren sowie die Spannungshaltung im ihnen unterlagerten Niederspannungsnetz steht.

Bereits heute treten durch die Einbindung von Photovoltaikanlagen erste Herausforderungen in der Betriebsführung der Netze auf [1]. So ist mit einer Zunahme der Volatilität innerhalb der Spannungsverläufe und Lastflüsse in Verteilungsnetzen ebenso zu rechnen wie mit einer Erhöhung der Auslastung und der Anzahl von Übertretungen des normativ vorgegebenen Spannungsbandes.

Diese Herausforderungen fordern innovative neue Betriebskonzepte auf der Verteilungsnetzebene. Ein Kernelement heutiger Verteilungsnetze sind Ortsnetzstationen, welche die Hauptaufgabe einer verbrauchernahen Transformation zwischen der Mittel- und der Niederspannungsebene

erfüllen. Ziel der nachfolgenden Untersuchungen ist es, die Einflussmöglichkeiten der Ortsnetzstationen, in Verbindung mit autark arbeitenden Stufenstellern, auf den zukünftigen Netzbetrieb zu ermitteln und mögliche neue Anforderungen an die Verteilungstransformatoren sowie die nötigen Stufensteller und Kommunikationseinheiten zu ermitteln.

Untersuchungsgrundlage

Um die funktionalen Anforderungen an Ortsnetzstationen innerhalb zukünftiger Verteilungsnetze zu ermitteln wurde ein Modell entwickelt, welches eine die Nieder- und Mittelspannungsebene übergreifende Analyse ermöglicht. Dazu werden drei reale Mittelspannungsnetze unterschiedlicher Ausprägung (ländlich, vorstädtisch, städtisch) mit integrierten hochaufgelösten synthetischen Niederspannungsnetzen [2] einem Analyseverfahren unterzogen, welches die Entwicklung dezentraler Erzeuger (KWK, Wind, PV) und Elektro- und Hybridfahrzeugen innerhalb der Verteilungsnetze berücksichtigt. Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchung wurde dieses Modell hinsichtlich einer detaillierten Simulation von Ortsnetz-

stationen erweitert und auf die später vorgestellten Szenarien angewandt.

Modellierung der intelligenten Ortsnetzstationen

Unter dem Begriff *Intelligente Ortsnetzstation* wird an dieser Stelle in erster Linie ein um die Möglichkeit zur Spannungsregelung des unterlagerten Niederspannungsnetzes aufgewertete Ortsnetzstation verstanden werden, wobei zunächst einschränkende Randbedingungen außer Acht gelassen werden (zur Spannungsregelung verwendete Technologie, Erfassung der Spannung im unterlagerten Netz etc.). Dies begründet sich damit, dass Anforderungen ermittelt und nicht verschiedene Ausgestaltungen verglichen werden sollen. Darüber hinaus wird das Erwärmungsverhalten von ölisierten Ortsnetztransformatoren untersucht, da dies eine Grundvoraussetzung ist, um in zukünftigen Verteilungsnetzen *Intelligente Ortsnetzstationen* in wie auch immer geartete Lastmanagementstrategien einzubinden.

Das erstellte Modell geht folglich von vollständiger Information über alle für die Regelung der Spannung notwendigen Messgrößen aus, d.h. insbesondere werden uneingeschränkt alle in der Simulation verfügbaren Spannungswerte aus den unterlagerten Niederspannungsnetzen in die Berechnung des optimalen Reglerverhaltens einbezogen.

Der Stufenschalter wird derart modelliert, dass unter Berücksichtigung der vorliegenden Spannungswerte, jeweils bei Erreichen eines im Netzgebiet vorliegenden Grenzwertes der Spannung ($U_N \pm 10\%$), um eine Stufe geschaltet wird. Somit kann ohne die Aufwendige Untersuchung von Algorithmen für die Spannungsregelung immer eine Einhaltung der Spannungsgrenzwerte garantiert werden, solange nicht an verschiedenen Punkten im Netz die

Spannung entgegengesetzte Grenzwerte erreicht (d.h. zeitgleich an min. zwei Punkten im Netz $U_N + 10\%$ und $U_N - 10\%$). Die Anforderungen an *intelligente Ortsnetzstationen* hinsichtlich der Spannungsregelung lassen sich somit herleiten.

Zur Identifizierung der Anforderungen an zukünftige ölgefüllte Verteilungstransformatoren werden in 15-Minuten-Intervallen ganzjährige Belastungsverläufe ermittelt. Das thermische Verhalten sowie die relative Restlebensdauer ölgefüllte Verteilungstransformatoren werden dabei auf Basis der DIN IEC 60076-7 [3] modelliert. Dabei kann zwischen Kompaktstationen sowie freistehenden Verteilungstransformatoren unterschieden werden. Da die Belastung der Transformatoren aufgrund der beschriebenen Lastmodellierung in 15-Minuten-Intervallen vorliegt, wird der Ansatz über die Lösung mittels der in Differenzgleichungen überführten Differentialgleichungen gewählt (siehe Abb. 1).

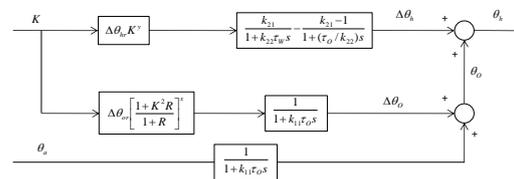


Abb. 1: Blockdiagrammdarstellung der Differentialgleichungen zur Ermittlung der Heißpunkttemperatur nach [3]

Mittels dieses Ansatzes lassen sich willkürliche zeitveränderliche Lastfaktoren sowie zeitveränderliche Umgebungstemperaturen im Modell abbilden und die Heißpunkttemperatur θ_h sowie Temperatur der obersten Ölschicht θ_o innerhalb der Transformatoren simulieren. Innerhalb der Modellierung werden unterschiedliche Leistungsklassen berücksichtigt sowie freistehenden Verteilungstransformatoren und Kompaktstationen realisiert. Die Lebensdauer der Verteilungstransformatoren wird unter der

Annahme des Einsatzes von nicht thermisch stabilisiertem Papier bestimmt nach folgender Formel:

$$V = 2^{(0_h - 98)/6}$$

Szenarioauswahl

Ziel der Szenariountersuchung ist sowohl die Abschätzung des in Deutschland zu erwartenden Bedarfs an spannungsgeregelten *intelligenten Ortsnetzstationen* als auch des zu erwartenden *Einflusses auf Verteilungstransformatoren*. Untersuchungen zu Regelalgorithmen, Anforderungen an die Bandbreite der Regelung, der Kommunikation, der Schalthäufigkeit (bei Einsatz von Stufenschaltern) etc. sind möglich, jedoch an dieser Stelle aus Platzgründen nicht darstellbar.

Die Simulationen wurden sowohl an Netzmodellen basierend auf neun verschiedenen Niederspannungsnetztypen nach [2], welche die Gesamtheit der deutschen Niederspannungsnetze widerspiegeln, als auch an drei realen Mittelspannungsnetzen (ländlich, vorstädtisch sowie städtisch) inkl. unterlagerter synthetischer Niederspannungsnetze durchgeführt. Innerhalb der drei Verteilungsnetztypen wurden Photovoltaikanlagen, kleine Windkraft sowie auch KWK-Anlagen in den Modellen berücksichtigt. Neben probabilistischen Haushaltsprofilen kamen auch Elektrofahrzeuge und Plug-In-Hybrid Fahrzeuge in der Modellierung zum Einsatz. Basierend auf agentenbasierten Modellen nach [4] wurden Durchdringungsszenarien der einzelnen Technologien ermittelt. Durch Daten des Deutschen Wetterdienstes konnten für eine Vielzahl Regionen Deutschlands regenerativen Erzeuger in den Verteilungsnetztypen simuliert werden. Zur Analyse der Anforderungen an Stufensteller in Gesamtdeutschland wurde basierend auf den neun Niederspannungsnetztypen verschiedenen Belastungssituationen simuliert un-

ter Beachtung, dass keine Leitungen überlastet werden.

Ergebnisse

Erwartungsgemäß treten Spannungsprobleme in Niederspannungsverteilungsnetzen auch weiterhin tendenziell in ländlichen Gebieten auf, wie Abb. 2 deutlich macht. In etwa 35 % der Netze vom Typ 1, in 65 % der Netze vom Typ 2 und in 20 % der Netze vom Typ 3 sind derartige Herausforderungen zu erwarten und sollten bei der Netzplanung rechtzeitig Berücksichtigung finden.

Des Weiteren muss festgestellt werden, dass einem Großteil dieser Herausforderungen mittels Stufenschaltern begegnet werden kann. In jeweils etwa 75 % der auftretenden Netze mit Spannungsproblemen kann eine Spannungsregelung in der Ortsnetzstation die Probleme beheben, wobei in der überwiegenden Zahl der Fälle eine Regeleinheit ausreicht. Lediglich in 5 % der Netze vom Typ 1 und in 15 % der Netze vom Typ 2 müsste Regeleinheiten für die einzelnen Niederspannungsabgänge installiert werden.

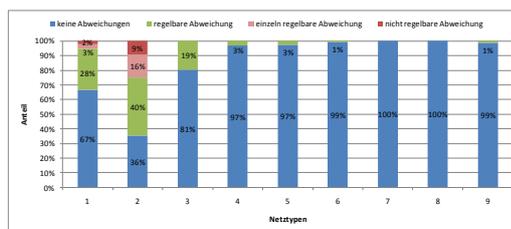


Abb. 2: Netztypen

Auf Grund der steigenden Belastungen durch einen gestiegenen Anteil an PV-Anlagen in den Niederspannungsnetzen werden im Jahr 2015 im ländlichen Netz im Mittel ca. 2 Verteilungstransformatoren gewechselt (siehe Abb. 3). Im städtischen Netz spielen Überlastungen der Verteilungstransformatoren nur eine untergeordnete Rolle, so ist im Jahr 2025 und 2030 im Mittel ein Verteilungstransformator ge-

wechselt worden. In Abhängigkeit der einer Ortsnetzstation unterlagerten Anzahl an PV-Anlagen, kann es jedoch auch zu einer wesentlich höheren Anzahl zu wechselnder Verteilungstransformatoren kommen. So kann es im ländlichen Netz ab dem Jahr 2020 zu einem Wechsel von 6 Verteilungstransformatoren kommen.

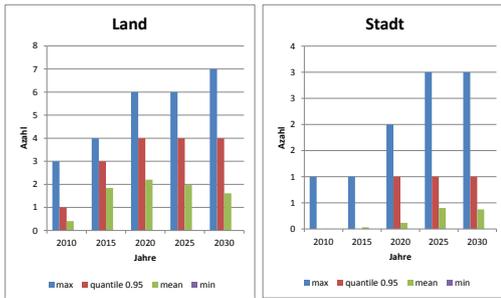


Abb. 3: Anzahl der ausgetauschten freistehenden Verteilungstransformatoren

Im vorstädtischen Netz ist bis zum Jahr 2025 ein kontinuierliches Wachstum in den Mittelwerten zu erkennen, dabei werden im Jahr 2025 im Mittel ca. 3 Verteilungstransformatoren gewechselt. Durch den Einbau von Kompaktstationen, anstatt freistehender Verteilungstransformatoren, lässt sich im Mittel kein signifikanter Anstieg der zu wechselnden Verteilungstransformatoren verzeichnen. Jedoch zeigt sich eine Verschiebung innerhalb der Gründe für einen Austausch von Verteilungstransformatoren. So ist der Hauptgrund für einen Wechsel nun das Überschreiten der maximalen Heißpunkttemperatur von 120 °C und nicht wie bei freistehenden Transformatoren das Überschreiten eines maximalen Lastganges von 1,5 U_n.

In Abb. 4 ist beispielhaft der Verlauf der Heißpunkttemperaturen eines 630kVA Verteilungstransformators für einen Woche aus dem Monat Juni im Jahresverlauf dargestellt. Lagen im Jahr 2010 die Temperaturschwankungen noch bei ca. 20 °C je Tag, sind es im Jahr 2020 je nach Belas-

tungssituation bereits 60 °C je Tag. Im Jahr 2030 belaufen sich die täglichen Anstiege bereits auf bis zu 90 °C an einem Tag.

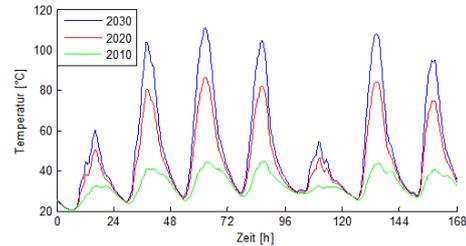


Abb. 4: Entwicklung des Temperaturverlaufs eines 630kVA Transformators aus dem Monat Juni

Durch die Veränderungen der Verläufe der Heißpunkttemperatur vom Jahr 2010 auf das Jahr 2020 keine signifikanten Einflüsse auf den jährlichen Lebensdauerverbrauch festzustellen. So kam es gerade einmal zu einer Erhöhung des jährlichen Lebensdauerverbrauches von 4,3 Stunden im Jahr 2010 auf 391 Stunden im Jahr 2020. Beide Werte sind bei einer nach [3] angegebenen maximalen Lebensdauer von 180.000 Stunden als sehr niedrig zu bezeichnen. Trotz der wesentlich geringeren relativen Zunahme der Heißpunkttemperatur vom Jahr 2020 auf das Jahr 2030, hat diese einen wesentlich höheren Einfluss auf den Lebensdauerverbrauch. So beträgt der jährliche Lebensdauerverbrauch im Jahr 2030 bis zu 12.651 Stunden. Dies entspricht ca. 1,4 Jahren.

Zusammenfassung

Spannungsprobleme in Niederspannungsverteilungsnetzen treten auch weiterhin tendenziell in ländlichen Gebieten auf. In 75 % der Fälle lassen sich diese jedoch durch den Einsatz eines Stufenschalters beheben. Bei der Betrachtung von 5-Jahresintervallen werden im Mittel weniger als 2 Verteilungstransformatoren im ländlichen sowie vorstädtischen Netz gewechselt. Die Einführung von Kompaktstation in das Modell führte zu einer Verschiebung

der Überlastungsgründe vom Überschreiten des maximalen Lastfaktors hin zur Überschreitung der Heißpunkttemperatur. Jedoch war kein Einfluss auf Gesamtanzahl überlasteter Verteilungstransformatoren feststellbar.

Quellen

- [1] H. Wallner: Integration von Photovoltaikanlagen und Biogasanlagen in die Verteilnetze. BDEW-Fachkongress „Treffpunkt Netze 2010“, Regensburg, 2010.
- [2] C. Matrose: Analyse der Einflüsse einer massiven Integration von Elektrofahrzeugen auf die europäischen Übertragungs- und Verteilnetze, Diplomarbeit am IFHT, 2009.
- [3] DIN IEC 60076-7: Leistungstransformatoren – Teil 7: Leitfaden für die Belastung von ölgefüllten Leistungstransformatoren. Stand 2008.
- [4] M. Gödde: Technische Analyse des Einflusses verteilter Energiewandlungseinheiten auf Verteilungsnetze mithilfe eines agentenbasierten Investitionsmodells, Diplomarbeit am IFHT, 2010.

Kontakt

Dipl.-Ing. Michael Peitz
peitz@ifht.rwth-aachen.de
+49 (241) 80-49331

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

Modellierung technologischer Netzausbauvarianten

Vor dem Hintergrund des steigenden Transportbedarfs von elektrischer Energie in Europa finden verschiedene Technologien Einzug in die Höchstspannungsnetze, welche die Transportkapazitäten steigern und die Steuerbarkeit von Leistungsflüssen im Netz verbessern. Um den Nutzen dieser Technologien bewerten zu können und um optimale technologische Lösungen für verschiedene Anforderungen zu identifizieren, ist eine adäquate Modellierung der Technologien und deren Betriebsführung erforderlich. Die Abbildung ausgewählter Technologien wird vorgestellt und abschließend in Anwendungsbeispielen veranschaulicht.

Einleitung

Mit dem verstärkten Ausbau regenerativer Energiequellen sowie der Liberalisierung der Strommärkte stößt das europäische Übertragungsnetz zunehmend an seine Belastungsgrenzen. Zur Erhöhung der Kapazitäten sowie zur besseren Ausnutzung der bestehenden Kapazitäten finden verschiedene Technologien Einzug in die Netze. Ziel der Untersuchungen am IFHT ist die ganzheitliche Bewertung der verschiedenen Technologien, wobei deren adäquate Modellierung Grundvoraussetzung ist.

Verschiedene Technologien können die Transportkapazität der bestehenden Struktur erhöhen, eine bessere Steuerbarkeit der Leistungsflüsse im Netz ermöglichen und damit die Ausnutzung sowie die Stabilität und Sicherheit des Netzes verbessern. In diesem Beitrag werden am IFHT entwickelte Methoden vorgestellt, mit denen der Technologienutzen im stationären Netzbetrieb abgebildet werden kann. Nachfolgend werden Ansätze aufgezeigt, mittels derer eine optimale Platzierung der Technologien im Netz determiniert werden kann.

Technologiemodellierung

Von besonderem Interesse ist die Abbildung von Technologien, die einen Steuerungseingriff erlauben. Dazu sind unter

anderem HGÜ-Systeme¹, die eine Steuerung der Übertragungsleistung zulassen, oder FACTS²-Elemente sowie Längs- und Querregeltransformatoren zu zählen, die in Drehstromsystemen (AC-Systemen) ebenfalls Wirk- und Blindleistungsflüsse beeinflussen können. Die Ströme über passive Elemente, wie beispielsweise AC-Leitungen, stellen sich dagegen rein in Abhängigkeit der konstanten Impedanzen der Elemente sowie der komplexen Knotenspannungen des Netzes und somit der Einspeisungen und Lasten ein. Eine Simulation dieser passiven Elemente im Netzbetrieb und der resultierenden Leistungsflüsse ist somit vergleichsweise einfach, eine entsprechende Modellierung der Einspeisung und Lasten vorausgesetzt. Bei steuerbaren Elementen muss dagegen eine Methodik zur Modellierung des Einsatzes dieser Technologien gefunden werden. Ziel ist somit, die optimalen Arbeitspunkte der Komponenten innerhalb der konkreten Netzsituation zu ermitteln. Dazu wird das Betriebsverhalten dieser Technologien in eine Optimierung überführt, die einen Arbeitspunkt für jedes Element in Abhängigkeit des Netzzustandes identifiziert.

Eine solche Optimierung wird beispielsweise über eine Erweiterung der Leistungs-

¹ HGÜ: Hochspannungsgleichstromübertragung

² FACTS: Flexible AC Transmission Systems

flussoptimierung (engl. und nachfolgend: Optimal Power Flow, OPF) umgesetzt.

Optimal Power Flow

Mathematisch betrachtet, ist der Optimal Power Flow eine nichtlineare Optimierung unter Nebenbedingungen. Eine Zielfunktion f wird unter Beachtung von Gleich- und Ungleichheitsbedingungen G und H minimiert. Je nach Design können in der Zielfunktion beispielsweise Erzeugungskosten, Redispatchkosten oder etwa Stabilitätsindikatoren enthalten sein. In der klassischen Formulierung sind in den Gleichheitsnebenbedingungen G die Leistungsflussgleichungen abgebildet, die Ungleichheitsbedingungen repräsentieren die Einhaltung der Strombelastbarkeiten, des Spannungsbandes sowie der Kraftwerksgrenzen. Unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen werden die variablen Netzeinspeisungen nach Wirk- und Blindleistung sowie die Knotenspannungen nach Betrag und Phase bestimmt, die entsprechend der Zielfunktion zum Optimum führen.

Die Abbildung der Technologien kann über eine Erweiterung des Optimal Power Flows erreicht werden, indem die entsprechenden steuerbaren Parameter zusätzlich zu den Einspeisungen und den Spannungen in den Zustandsvektor integriert werden. Zudem müssen Nebenbedingungen angepasst bzw. hinzugefügt werden, um dem modifizierten Optimierungsproblem Rechnung zu tragen.

Abbildung von HGÜ

HGÜ-Systeme bieten gesamtsystemisch einen zusätzlichen Freiheitsgrad, da – im Gegensatz zu AC-Leitungen – die Wirkleistungsübertragung innerhalb der Betriebsgrenzen steuerbar ist. Selbstgeführte Umrichter (engl. Voltage Source Converter – VSC) können zudem am AC-Verknüpfungspunkt in großen Arbeitsbereichen Blindleistung bereitstellen. Eine

adäquate Modellierung muss diese Möglichkeiten beachten und soll, abhängig von Übertragungsaufgabe und Netzzustand, die gesamtsystemisch optimalen Arbeitspunkte identifizieren. Dabei ist zu beachten, dass diese Betrachtung nur den stationären Betrieb umfassen soll und einer Arbeitspunktoptimierung im vereinfachten gesamtsystemischen Kontext dient. Eine Vielzahl weiterer Aspekte ist Gegenstand aktueller Untersuchungen, so zum Beispiel das Verhalten der HGÜ im Fehler- und (n-1)-Fall bzw. bei dynamischen Vorgängen im Allgemeinen.

Die Umrichter sind als aktive Elemente eines HGÜ-Systems wesentlicher Teil der modelltechnischen Abbildung. Zum einen ist die Bilanz der Leistungen auf Gleich- und Wechselspannungsseite inklusive der Umrichterverluste abzubilden. Zum anderen ist im Fall von VSC-Umrichtern die Blindleistungsbereitstellung AC-seitig sowie deren Einschränkung in Abhängigkeit der Wirkleistungsübertragung, der AC- und der DC-Spannung in Nebenbedingungen abzubilden. Bei CSC-Umrichtern (engl. Current Source Converter – CSC) wird der nicht beeinflussbare Blindleistungsbedarf ebenfalls in Abhängigkeit der genannten Größen modelliert. Zur vereinfachten Abbildung werden nichtlineare Zusammenhänge, wie die Einschränkung der Blindleistungsbereitstellung oder die Abhängigkeit der Umrichterverluste von der Übertragungsleistung linearisiert. Somit ist es möglich, den Umrichter über lineare Nebenbedingungen im Optimal Power Flow abzubilden.

Neben den Umrichtern sind die DC-Leitungen abzubilden. Neben den heute verbreiteten Punkt-zu-Punkt-Verbindungen werden vermehrt Multi-Terminal-Systeme angestrebt, in denen DC-seitig mehrere Umrichter verbunden sind und ggf. sogar

ein vermaschtes DC-Netz möglich ist. Zur korrekten Abbildung der Übertragungsverluste und der Leistungsflüsse im Multi-Terminal-System ist eine Modellierung der Gleichspannungen innerhalb des HGÜ-Systems notwendig. Analog zum AC-Netz werden aus diesem Grund Leistungsflussgleichungen für das HGÜ-System – unabhängig ob Punkt-zu-Punkt oder Multi-Terminal – aufgestellt und im Modell implementiert. Die Ströme und Spannungen werden mit Ungleichheitsnebenbedingungen auf die gültigen Betriebsbereiche beschränkt.

Durch die genannten Erweiterungen des Optimal Power Flows zur Abbildung des HGÜ-Umrichter und der Gleichspannungsleitungen ist eine Möglichkeit geschaffen, Leistungsflüsse im Wechselspannungs- und Gleichspannungsnetz geschlossen und simultan zu berechnen und zugleich die steuerbaren Größen der HGÜ so in den OPF zu integrieren, dass ihr optimaler Arbeitspunkt im jeweiligen Netzzustand parallel zur Optimierung der OPF-Standardformulierung bestimmt wird. Es ist darüber hinaus möglich, die Einspeisungen zu fixieren und den Algorithmus nur die freien Variablen des Netzes einstellen zu lassen, sodass eine realitätsnahe Netzbetriebsführung unter vorgegebenen Kraftwerkseinsatz simuliert wird.

Eine Anwendung der HGÜ-Modellierung ist in Abbildung 1 dargestellt. Aufbauend auf dem am Institut angewendeten Modell des europäischen Übertragungsnetzes wird ein überlagerndes HGÜ-Overlay-Netz modelliert und mit der dargestellten Methodik simuliert. Wie gewünscht, identifiziert der Optimal Power Flow gesamtsystemisch optimale Arbeitspunkte für die Wirkleistungsübertragungen und Blindleistungseinspeisungen der Umrichter im HGÜ-Netz. In folgenden Analysen können der Nutzen

eines solchen Netzes determiniert und darüber hinaus die Arbeitspunkte als Eingangsdaten für detailliertere technische Analysen verwendet werden.

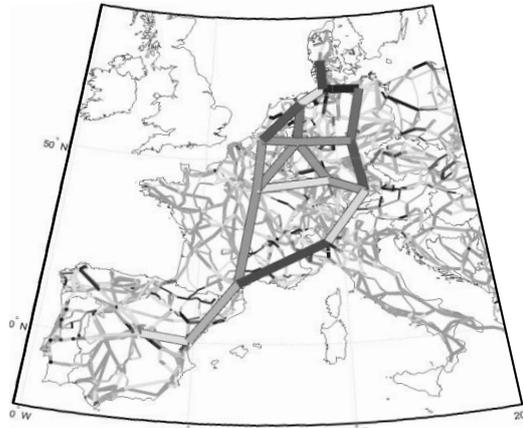


Abb. 1: Simulation HGÜ-Overlay

Abbildung von leistungsflusssteuernden Technologien in AC-Netzen

Die Steuerung von Leistungsflüssen im konventionellen Drehstromsystem kann mittels Phasenschieber-Transformatoren (PST) und FACTS-Elementen erfolgen. Auch diese werden im Optimal Power Flow abgebildet, um ihren Einsatz simulieren zu können. Der Großteil dieser Komponenten lässt sich vereinfacht als variables Element im generischen π -Ersatzschaltbild (π -ESB) abbilden, das in Abbildung 2 dargestellt ist. Exemplarisch ist hier die Serienreaktanz als variabel eingezeichnet, wie es beispielsweise die Modellierung eines TCSC-FACTS³ erfordern würde. Die Variable, hier X, wird in den Zustandsvektor aufgenommen und mit Ungleichheitsnebenbedingungen auf ihren realen Arbeitsbereich beschränkt.

Im Gegensatz zu der zuvor dargestellten Modellierung der HGÜ-Umrichter reichen in diesem Fall keine linearen Nebenbedin-

³Thyristorgesteuerte Serienkompensation

gungen aus, da die Abhängigkeit der Leistungsflüsse von den Elementen des π -ESB nichtlinear ist. Eine korrekte Implementierung erfordert daher eine Bestimmung der mathematischen Zusammenhänge in Form der Abhängigkeit der Leistungsflüsse von den veränderlichen Größen. Diese werden dem OPF entsprechend vorgegeben, sodass der Arbeitspunkt des leistungsflusssteuernden Elementes, der im gesamtsystemischen Kontext zum Minimum der Zielfunktion unter Einhaltung aller Nebenbedingungen führt, bestimmt wird.

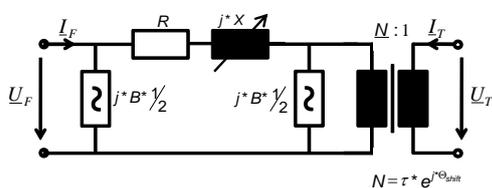


Abb. 2: Generisches π -ESB

Systemoptimierung

Die Modellierung aktiv gesteuerter Technologien über die die Erweiterung des Optimal Power Flows wird in Untersuchungen genutzt, um den Einsatz dieser Technologien vergleichend zu bewerten und um realistische Netzzustände für detailliertere Nachfolgeuntersuchungen zu definieren. Des Weiteren finden diese Modelle Eingang in eine ganzheitliche Systemoptimierung, mittels derer erforderliche Netzoptimierungs-, Netzverstärkungs- und Netzausbaumaßnahmen automatisiert bestimmt werden.

Hierbei bilden die beschriebenen modifizierten Optimierungsansätze wesentliche Bewertungsindikatoren der multikriteriellen Bewertung. So wird z.B. das *optimale* Ensemble an Technologien (HGÜ-Systeme, FACTS-Elemente, AC-Leitungsneubau, Flexibilisierungsmaßnahmen, etc.) unter ökonomischen, ökologischen und stabilitätstechnischen Kriterien unter Verwendung geeigneter Indikatoren

ermittelt. Die Lösung bildet hierbei nicht ein oder das Optimum ab, sondern vielmehr bedienen sich die verwendeten Verfahren dem Prinzip der Pareto-Optimalität, so dass die Lösung durch eine Lösungsschar gebildet wird.

Die Vielzahl der gewonnenen technischen Ausprägungen eines möglichen Netzausbaus wird weiteren, detaillierteren Untersuchungen zugeführt, um den Ausbau als Ganzes bzw. einzelne Maßnahmen objektiv und multikriteriell bewerten und selektieren zu können.

Quellen

- [1] H. Natemeyer, M. Scheufen, S. Winter, T. Dederichs, A. Schnettler: Identification of environmentally relevant network hotspots, IEEE PowerTech Conference, Trondheim, 19.-23. Juni 2011

Kontakt

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

Dipl.-Wirt.-Ing. Andreas Roehder
 roehder@ifht.rwth-aachen.de
 +49 (241) 80-94937

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

Ganzheitliche Bewertung des Energiesystems Deutschlands

Aus der wachsenden öffentlichen Wahrnehmung einer nachhaltigen Energieversorgung resultiert ein zunehmendes Interesse an wissenschaftlichen Methoden, die nicht allein technisch-ökonomische Analysen erlauben, sondern insbesondere auch ökologische und sozio-ökonomische Gesichtspunkte einbeziehen. In diesem Zusammenhang wird am IFHT durch Kombination verschiedener Verfahren eine Methodik entwickelt, die eine ganzheitliche Modellierung und Bewertung der elektrischen Energieversorgung in Deutschland ermöglicht.

Zur ganzheitlichen Bewertung der Energieversorgung wird am IFHT eine Methodik mit dem Ziel entwickelt, neue Technologien, wie etwa Speicher oder Elektrofahrzeuge, sowie Zukunftsszenarien zu analysieren und damit Empfehlungen für die optimale Transformation des Energiesystems zu geben. Hierbei werden nicht nur die Kostenaspekte sondern auch ökologische und soziale Auswirkungen berücksichtigt. Als Kernbestandteile der Methodik sind die Kraftwerkseinsatzplanung, das Strommarktmodell, die Entwicklung von Strommixszenarien sowie die Ökobilanzierung zu nennen, welche im Folgenden konkretisiert werden.

Kraftwerkseinsatzplanung und Strommarktmodellierung

Die Aufteilung der Kraftwerke auf eine Menge von Akteuren, die jeweils ihre eigenen Erzeugungskapazitäten auf den Märkten platzieren, führt dazu, dass aus dem systemübergreifenden Problem der Einsatzplanung viele kleine aktueursspezifische Teilprobleme werden.

Jeder Akteur optimiert den Einsatz seiner Kraftwerke unter der Prämisse, den erzielbaren Deckungsbeitrag zu maximieren. Dabei müssen insbesondere die folgenden technischen und ökonomischen Eigen-

schaften der Kraftwerke berücksichtigt werden:

- Mindeststillstands- und Betriebszeiten
- Maximale Gradienten der thermischen Blöcke
- Minimal- und Maximalleistungen
- Kalt- und Warmstartkosten

Hierzu wurden am IFHT in Anlehnung an [1] geeignete Verfahren entwickelt.

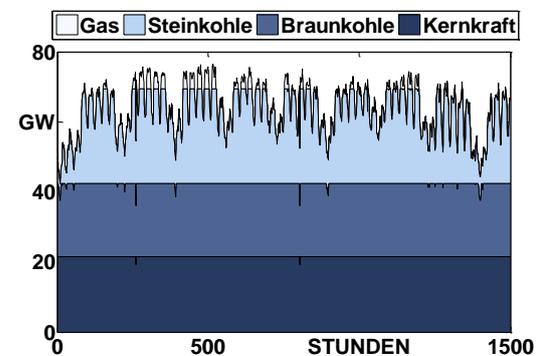


Abb. 1: Beispielhafter Einsatzfahrplan aller deutschen thermischen Kraftwerke

Es verbleibt trotz der Zerlegung des systemübergreifenden Entscheidungsproblems in aktueursspezifische Teilprobleme eine hohe Komplexität, welche durch die Teilnahme der Kraftwerksbetreiber an Strommärkten entsteht [2]. Die hinzu kommenden Unsicherheiten über die Entwicklung von Marktpreisen und das Verhalten anderer Marktteilnehmer müssen ebenfalls Berücksichtigung finden.

Durch die Abnahmeverpflichtung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen sind Netzbetreiber gezwungen, diesen kurzfristig am Spotmarkt zu verkaufen. Dabei müssen sie, nahezu jeden Preis akzeptieren. Dies führt zu einer stark zunehmenden Volatilität des Strompreises am Spotmarkt, wodurch Handelsstrategien von Kraftwerksbetreibern zukünftig daran angepasst werden müssen.

Um ökologische Fragestellungen und die Auswirkungen von Ausbauentscheidungen untersuchen zu können, wurde im vergangenen Jahr intensiv an der Weiterentwicklung von Verfahren zur Kraftwerkseinsatzplanung und an der Modellierung von Strommärkten gearbeitet.

Zukünftige Strommixszenarien

Das Ziel der Forschungsaktivitäten besteht nicht nur in der Modellierung der heutigen elektrischen Energieversorgung, sondern insbesondere auch in der Generierung und Bewertung zukünftiger Stromerzeugungsszenarien. In diesem Zusammenhang sind mögliche Ausbaupfade des Kraftwerksparks zu untersuchen. Die Generierung der Szenarien zur Kraftwerksausbauplanung erfolgt mittels einer volkswirtschaftlichen Gesamtkostenbetrachtung.

Die verstärkte Kopplung der europäischen Märkte und gemeinsame Klimaschutzabkommen haben die Rahmenbedingungen in diesem Sektor geändert. Zielsetzungen wie die Reduktion von CO₂-Emissionen um 80% bis 2050 in Vergleich zu 1990 sind in den Fokus gerückt. Unter anderem deswegen stößt auch der Bau neuer (fossiler) Kraftwerke, besonders in Deutschland, auf gesellschaftlichen Widerstand. In den letzten Jahren ist der Bau von über einem Dutzend Kraftwerken an Protest- und Mobilisierungsaktionen der Bevölkerung gescheitert.

Aufgrund der dynamischen Entwicklung und neuen Anforderungen im Bereich des „Zukünftigen Stromerzeugungsparks“ wird ein Modell unter ganzheitlichen Kriterien entwickelt. Der ganzheitliche Ansatz beinhaltet hierbei ökonomische, ökologische, technische und sozioökonomische Einflussgrößen und Kriterien.

Bei dem gewählten Ansatz werden die Gesamtkosten der Entwicklung des Stromerzeugungsparks minimiert. Die Kosten werden dabei in die fixen Kosten, wie die Investitionskosten, und die arbeitsabhängigen variable Kosten, u.a. Brennstoffkosten, unterteilt. Die entsprechende Berücksichtigung technischer Kraftwerkseigenschaften wird durch die Nutzung und Implementierung einer entsprechenden Kraftwerkseinsatzplanung geleistet, in der die erforderlichen technischen Eigenschaften wie z. B. Mindeststillstandzeiten oder Anlaufzeiten der Stromerzeugungstechnologien integriert und modelliert werden. Die möglichen Kraftwerksausbauoptionen sind zunächst auf thermische Kraftwerke beschränkt. Die aggregierte Einspeisung aus erneuerbaren Energiequellen in die unterschiedlichen Netzebenen wird in dem Modell als Residuallast berücksichtigt. Die Einspeisung der EE wird von der Gesamtlast abgezogen und anschließend dem Modell zeitlich hochaufgelöst übergeben. Ein zentraler Bestandteil beim Umgang mit Unsicherheiten und Risiken, wie z.B. den Entwicklungen der regenerativen Energieträgern oder den Primärenergiepreisen, ist das Werkzeug der Szenarioanalyse, um möglichst viele unterschiedliche Entwicklungspfade zu generieren und adäquat zu berücksichtigen. Diese helfen mögliche Ausprägungen und Auswirkungen zukünftiger Strommixszenarien zu untersuchen.

Ökobilanzierung

Ergänzend zu der technischen Modellierung wird eine Ökobilanzierung des deut-

schen Stromerzeugungserzeugungssektors vorgenommen. Das Verfahren der Ökobilanzierung bezeichnet gemäß [3] „eine Methode zur Abschätzung der mit einem Produkt verbundenen Umweltaspekte und produktspezifischen potentiellen Umweltwirkungen [...]“. Angewendet auf den deutschen Stromerzeugungsektor bedeutet dies, dass alle vor- und nachgelagerten Prozesse von der Rohstoffbeschaffung über die Herstellung bis hin zur Inbetriebnahme und Entsorgung in die Betrachtung eingeschlossen werden. Somit können auch Erzeugungstechnologien, die keine direkten Emissionen verursachen (bspw. erneuerbare Energien), hinsichtlich ihrer Umwelteinwirkung bewertet werden.

Da die Emissionshöhe eines fossil befeuerten Kraftwerks signifikant von dessen Alter bzw. von dessen Wirkungsgrad abhängt, werden zur Detaillierung das Inbetriebnahmejahr sowie das kraftwerksindividuelle Teillastverhalten in die Bewertung einbezogen. Abb. 2 zeigt die Entwicklung des Wirkungsgrades in Abhängigkeit des Inbetriebnahmejahres.

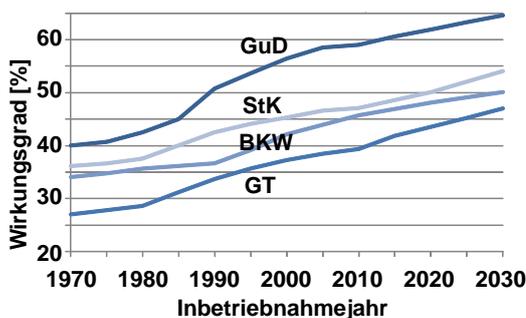


Abb. 2: Wirkungsgradentwicklung [5]

Wie zu erkennen ist, ergaben sich in den vergangenen Jahrzehnten große technologische Fortschritte, wodurch die Zustandsgrößen (Temperatur, Druck etc.) und damit der Wirkungsgrad deutlich gesteigert werden konnten. Der Wirkungsgrad eines

Kraftwerks ist jedoch keine konstante Größe, sondern kann als Funktion der elektrischen Leistung dargestellt werden [4]. Da die Abnahme des Wirkungsgrades im Teillastbetrieb nicht nur ökonomische, sondern durch den erhöhten Brennstoffbedarf auch ökologische Konsequenzen nach sich zieht, ist dieser Aspekt des Kraftwerksbetriebs im Rahmen einer Ökobilanzierung zu berücksichtigen. Abb. 3 zeigt das Teillastverhalten thermischer Kraftwerke in Abhängigkeit des relativen Arbeitspunktes (P/P_N).

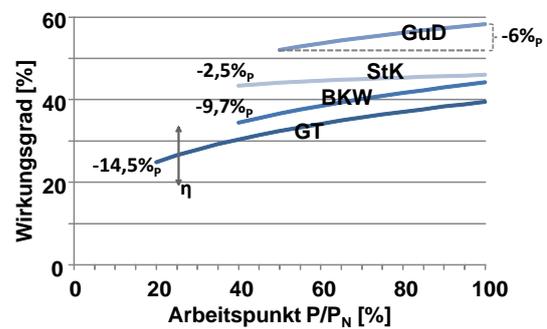


Abb. 3: Teillastverhalten thermischer Kraftwerke [4]

Wie in obiger Abbildung zu erkennen ist, unterscheiden sich die Kraftwerkstypen nicht allein durch die Höhe des Nennwirkungsgrades, sondern auch durch ihr individuelles Teillastverhalten. Die daraus resultierenden Folgen der Wirkungsgrad einbußen auf das spezifische Treibhauspotenzial werden in Abb. 4 aufgezeigt.

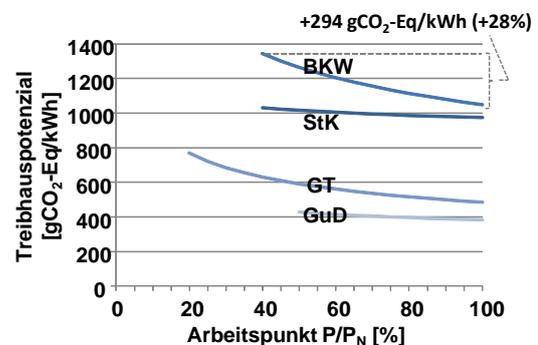


Abb. 4: Spezifisches Treibhauspotenzial im Teillastbetrieb [4]

Ergebnisse

Die zur Ermittlung der Emissionen benötigten Kraftwerksfahrpläne wurden mittels der oben vorgestellten Kraftwerkseinsatzplanung entwickelt. Das Ausbauszenario des deutschen Kraftwerkspark für 2030 beinhaltet einen schrittweisen Kernenergieausstieg bis 2023 sowie den Ausbau erneuerbarer Energien.

In Kombination mit einem vollständig georeferenzierten Kraftwerkspark sowie einer regionalisierten Einspeisung aus erneuerbaren Energien werden sowohl eine Analyse zeitlicher Interdependenzen zwischen Kraftwerkseinsatz und Emissionshöhe ermöglicht als auch eine Lokalisierung der Emittenten. Exemplarisch werden dazu in Abb. 5 die mittleren spezifischen CO₂-Emissionen im Tagesverlauf innerhalb der vier deutschen Regelzonen dargestellt.

Die Unterschiede in Höhe und Verlauf resultieren durch die differierenden Erzeugungsportfolien der Regelzonen. So zeich-

nen sich einige im Grundlastbereich durch einen hohen Anteil an Braunkohlekraftwerken aus. Im Gegensatz dazu übernehmen andere Regelzonen überwiegend emissionsarme Kernkraftwerke die Grundlastdeckung, woraus ein niedrigeres Emissionsniveau resultiert.

Darüber hinaus zeigt der Vergleich der Ergebnisse für die Jahre 2010 und 2030, dass die Emissionszunahme durch den erwarteten Kernenergieausstieg durch den fortschreitenden Ausbau erneuerbarer Energien sowie moderner Kraftwerksneubauten mit optimierter Anlagentechnik überkompensiert wird, so dass in Summe ein Emissionsrückgang festzustellen ist.

Zusammenfassung

Durch Kombination der zuvor vorgestellten Methoden wird eine ganzheitliche Bewertung der deutschen elektrischen Energieversorgung ermöglicht. Durch die hohe zeitliche sowie räumliche Auflösung ist es möglich, einzelne Technologien sowie

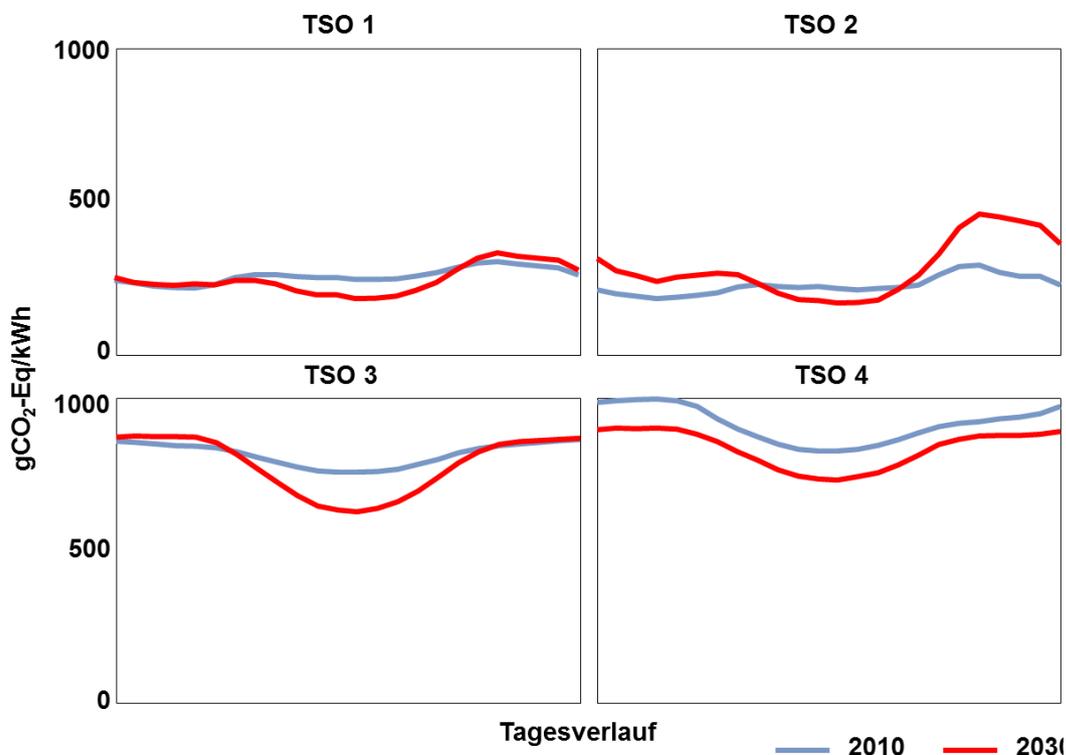


Abb. 5: Mittlere spezifische Emissionen im Tagesverlauf [gCO₂-Eq/kWh]

Regionen detailliert zu untersuchen, insbesondere hinsichtlich einer ganzheitlichen Bewertung. Besonderer Wert wird auf die Modellierung einer realitätsnahen Abbildung des Kraftwerkeinsatzes gelegt, wobei verschiedene Heuristiken sowie Optimierungsverfahren zum Einsatz kommen.

In weiteren Forschungsarbeiten am IFHT werden diese Arbeiten ergänzt um die Analyse und Modellierung von Regelenergiemärkten und CO₂-Märkten zur Integration von erneuerbaren Energien, die Integration von Speichersystemen wie etwa Großspeichern oder Demand Side Management sowie die Ausgestaltung zukünftiger Marktstrukturen.

Quellen

- [1] Carrión M., Arroyo J.M.: A Computationally Efficient Formulation for the Thermal Unit Commitment Problem, IEEE Transactions on power systems, VOL. 21, NO. 3, August 2006
- [2] Allen, E. et al.: Price-based commitment decisions in the electricity market, Springer Verlag, London, 1999
- [3] Normenausschuss Grundlagen des Umweltschutzes im DIN: Umweltmanagement– Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006), Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2006. Oktober 2006
- [4] Roth, H. et al.: Windenergiebedingte CO₂-Emissionen konventioneller Kraftwerke. IFE Schriftenreihe – Heft 50, 1. Aufl., Hrsg.: Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Technische Universität München 2005
- [5] Krautz, H. J.: Energieeffizienz als Herausforderung für CCS. Energietag, Brandenburg 2009, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Lehrstuhl Kraftwerkstechnik

Kontakt

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

Dipl.-Wirt.-Ing. Stephan Raths
raths@ifht.rwth-aachen.de
+49 (241) 80-94909

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

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

Dipl.-Wirt.-Ing. Robert Tempels
tempels@ifht.rwth-aachen.de
+49 (241) 80-93038

IEA-RETRANS2 Regions – Chancen für die Nutzung erneuerbarer Energie im Straßenverkehr in Nordamerika, Europa und China

Dieses Projekt zielt darauf ab, Chancen und Herausforderungen der Co-Evolution von Elektrofahrzeugen und erneuerbarer Elektrizität in drei Weltregionen zu identifizieren: Nordamerika, Europa und China. Die verschiedenen gesellschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen dieser drei Regionen führen zu unterschiedlichen Entwicklungen für eine solche Co-Evolution.

Einleitung und Motivation

In 2009/2010 gab IEA-RETD das Projekt RETRANS in Auftrag, das verschiedene Optionen der Verknüpfung von Elektrizität aus erneuerbaren Quellen und Elektrofahrzeugen untersuchte [1]. Diese Nutzung sollte zu einer Co-Evolution der Sektoren Energie und Verkehr führen. Im Nachfolgeprojekt RETRANS2Regions wurde der Einfluss der unterschiedlichen Rahmenbedingungen für die Integration von Elektrofahrzeugen (EV) und Elektrizität aus erneuerbaren Quellen (RES-E) in drei Weltregionen untersucht. Zu diesem Zweck wurden Studien und Pilotprojekte bezüglich der Erfahrung mit der Nutzung von EV ausgewertet. Relevante statistische Daten sowie politische Maßnahmen wurden analysiert. Experteninterviews boten Einblick in die Entwicklung der regionalen Elektrizitätssektoren. Das IFHT arbeitete in diesem Projekt mit Partnern aus Dänemark, China und Kanada zusammen [2].

Rahmenbedingungen für Elektrofahrzeuge und Elektrizität aus erneuerbaren Quellen

Die wirtschaftlichen und demographischen Rahmenbedingungen der drei Weltregionen unterscheiden sich z.T. erheblich. Die Mobilitätsinfrastruktur und -lösungen, die der

Bevölkerung zur Verfügung stehen, sind ebenfalls grundlegend verschieden. Somit werden für die drei Weltregionen unterschiedliche politische Maßnahmen und Anreize notwendig sein, um neue Technologien im Verkehrs- und Energiesektor einzuführen.

Der Anteil erneuerbarer Elektrizität am Strommix ist in allen Regionen ähnlich. Je nach Bilanzraum variiert der Anteil jedoch zwischen 1 % und 99 %. In China wird eine zentrale Stromproduktion aus erneuerbaren Quellen aufgebaut, während in Nordamerika und Europa erneuerbare Elektrizität vor allem verteilt ausgebaut wird. Anreizsysteme für RES-E sind nur in Europa verbreitet.

Die EV-Integration betrifft zumeist Verteilungsnetze. Europäische Verteilungsnetze können eine hohe Anzahl EV aufnehmen [3]. Netze in den anderen Regionen werden früher Überlastungen sehen. Ein Zuwachs an RES-E wird lokale Verstärkungen der Verteilungsnetze in Nordamerika fördern. In China wird dadurch eher die Übertragungskapazität erhöht.

Smart Grid Technologien werden zunächst in Nordamerika eingeführt, um Verteilungsnetze lokal zu stärken. Mit wachsenden EV-Zahlen in China wird dort eine geregelte Ladung der Fahrzeuge notwendig werden.

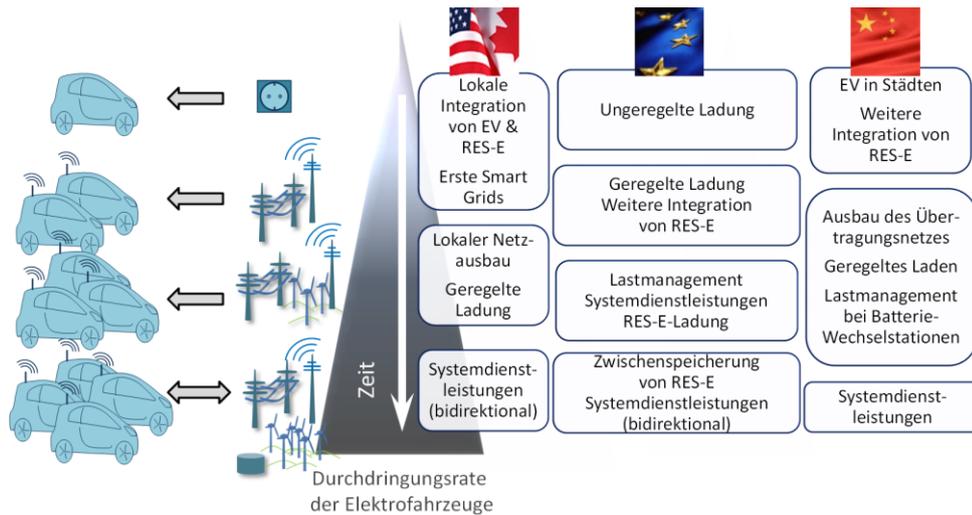


Abb. 1: Roadmap zur Co-Evolution von EV und RES-E

Vergleich verschiedener politischer Maßnahmen

In Nordamerika werden erneuerbare Erzeugung und der Einsatz von EV zumeist lokalen Netzausbau fördern. Dies sollte politisch unterstützt werden. Um die Co-Evolution zu fördern, muss der Markteintritt von EV und RES-E unterstützt werden. Die Rentabilität der Technologien wird für die öffentliche Akzeptanz jedoch entscheidend sein. Indirekte Anreize (z.B. Steuervorteile) werden wahrscheinlich öffentlich akzeptiert werden.

In Europa sollten sich politische Maßnahmen auf Infrastrukturausbau, Standardisierung und erweiterte Nutzung konzentrieren. Gerade paneuropäische Maßnahmen müssen mittels Standardisierung einen gemeinsamen Handlungsrahmen für Staaten schaffen. Aktuell werden in Pilotprojekten verschiedene Kombinationen von Verkehrsmitteln im Zusammenspiel erprobt. Dies deutet darauf hin, dass lokalisierte Mobilitätslösungen gefunden werden müssen. Die Ladung mit RES-E als Förderbedingung für EV wäre ein starkes Werkzeug, um die zwei Sektoren zu verbinden.

In China könnten EV eine wirksame Maßnahme zur Verbesserung ländlicher Mobili-

tät sein. Um ökologische Vorteile durchzusetzen, sollte ein Ladestromtarif die Ladung mit RES-E garantieren. Da politische Impulse einen starken Einfluss im Energie- und Verkehrssektor haben, könnte eine starre Kopplung zwischen EV- und RES-E-Zielen den Ausbau beider fördern.

Insgesamt wird deutlich, dass die unterschiedlichen Bedingungen der drei Weltregionen auch ihre jeweilige Co-Evolution unterschiedlich verlaufen lässt.

Quellen

- [1] RETRANS. <http://iea-retd.org/archives/publications/retrans>
- [2] Abschlussbericht RETRANS2 Regions <http://iea-retd.org/archives/publications/retrans-regions>
- [3] G4V: „Parameter Manual“ <http://www.g4v.eu/downloads.html>

Kontakt

Dipl.-Ing. Ann-Kathrin Meinerzhagen, MA
 meinerzhagen@ifht.rwth-aachen.de
 +49 (241) 80-93037

Ganzheitlich-probabilistische Zustandsbewertung von Verteilungsnetzen

Die zunehmende Integration dezentraler Energiewandlungseinheiten wie Photovoltaik-Anlagen und Elektrofahrzeuge stellt Verteilungsnetze und deren (Ausbau-)Planung vor neue Aufgaben. Um derzeitige und zukünftige Netz- und Betriebsmittelzustände als Grundlage der Netzplanung bewerten zu können, ist es notwendig, das Verhalten von Lasten und Erzeugern auf Nieder- und Mittelspannungsebene statistisch korrekt zu erfassen. Hier stellt die probabilistische Modellierung dezentraler Energiewandlungseinheiten eine sinnvolle Ergänzung zu Standardlastprofilen dar. Im Rahmen der probabilistischen Lastflussrechnung können die probabilistischen Eingangsdaten statistisch interpretiert und derzeitige und zukünftige Netz- und Betriebsmittelzustände bewertet werden.

Einleitung und Motivation

Die zunehmende Integration dezentraler Energiewandlungseinheiten (EWE) wie Photovoltaik-Anlagen, Mikro-Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen, Kleinwindenergieanlagen, Wärmepumpen oder Elektrofahrzeuge führt schon heute zur Überschreitung der zulässigen Spannungsgrenzen im Verteilungsnetz oder zu Betriebsmittelüberlastungen. Der notwendige Netzausbau ist häufig nicht Resultat langfristiger, strategischer Netzausbauplanung, sondern eine durch den Anschluss dezentraler EWE initiierte, notwendige Maßnahme. Die Auslastung der Betriebsmittel und die Spannungshaltung, insbesondere im Niederspannungsnetz, sind häufig unbekannt und nur mit hohem Aufwand messbar.

Voraussetzung für eine strategische, langfristige Netzausbauplanung sind die Kenntnis und die Bewertung derzeitiger und zukünftiger Netzzustände. Diese sind, insbesondere in der Niederspannungsebene, nur unzureichend mit Hilfe von Standardlastprofilen abbildbar. Hier stellt die probabilistische Modellierung von Lasten und Erzeugern eine sinnvolle Ergänzung dar.

Die Art der probabilistischen Modellierung ist in hohem Maß abhängig von den in einem Verteilungsnetz gegebenen Informationen – ausgehend von den Kabel-, Freileitungs- und Transformatordaten über Art und Jahresenergiebedarf der Lasten bis hin zu möglichen Standorten zukünftiger EWE.

Die Abbildung der statistischen Eigenschaften dezentraler EWE und die Unsicherheiten bzgl. der Standorte zukünftiger, dezentraler EWE bedürfen probabilistischer Methoden bei der Auswertung der Ergebnisse der Lastflussberechnungen. Ein ganzheitlicher Ansatz berücksichtigt dabei das statistische Verhalten von Lasten (Haushalte, Elektrofahrzeuge, Wärmepumpen) und Erzeugern (Photovoltaikanlagen, Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, Kleinwindenergieanlagen).

Probabilistische Modellierung von Lasten und Erzeugern

Am Beispiel von Privathaushalten wurde am IFHT eine Methodik entwickelt, um Lasten in hoher zeitlicher Auflösung in einem Bottom-Up-Ansatz zu modellieren [1]. Dabei wird zwischen den Haushaltstypen Single-, Paar- und Familienhaushalt unterschieden. Der Haushaltstyp hat insbesondere einen Einfluss auf den durch

Besitzwahrscheinlichkeiten modellierten Gerätepark, aber auch auf Einschaltwahrscheinlichkeiten und Benutzungsdauern, die mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen modelliert sind (siehe Abb. 1). Zusätzlich sind für jedes Gerät Einschaltzeitpunkte und typische Leistungen in probabilistischer Weise aus Statistiken hinterlegt.

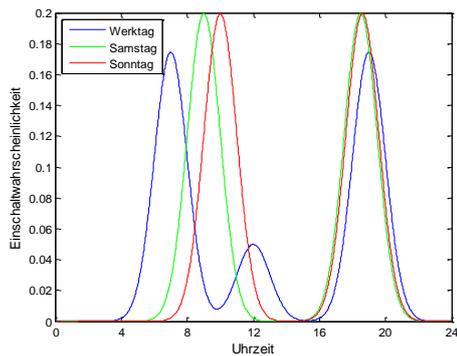


Abb. 1: Modellierung von Einschaltwahrscheinlichkeiten für Typtage

Die Summenlast von 5000 probabilistisch modellierten Haushalten stimmt – mit Korrelationskoeffizienten von 0,75 bis 0,96 – bei der Betrachtung vieler Haushalte gut mit Standardlastprofilen (SLP) überein, die bei verschiedenen Institutionen angewendet werden (siehe Abb. 2). Weiterhin wurde das probabilistische Modell durch den Vergleich mit Smart Meter Daten im Rahmen von Jahresdauerlinien validiert (siehe Abb. 3).

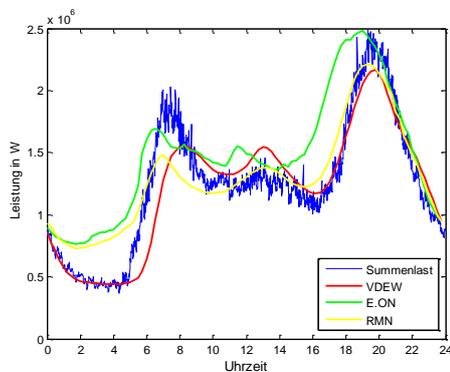


Abb. 2: Vergleich von 5000 probabilistischen Lastprofilen mit SLP

Durch die Zuordnung eines geeigneten Geräteparks konnte in gleicher Weise auch nachgewiesen werden, dass die Methodik zu ähnlich guten Ergebnissen bei der Nachbildung von Gewerbelasten führt. Bei der Modellierung von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen und Wärmepumpen wird auf probabilistische Wärmelastgänge zurückgegriffen, die mit entsprechenden Betriebsweisen kombiniert werden. Das statistische Verhalten von Photovoltaik- und Kleinwindenergieanlagen wird durch umfangreiche Wetterdaten abgebildet.

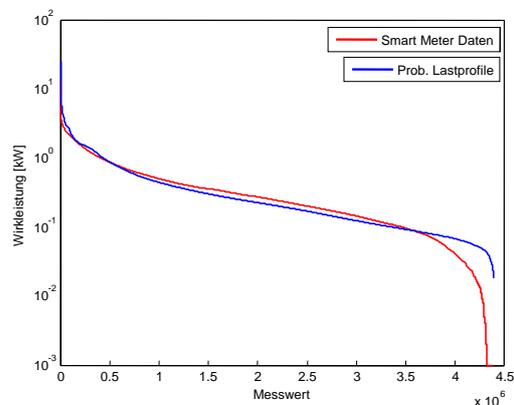


Abb. 3: Vergleich von Dauerlinien probabilistischer Lastprofile mit Smart Meter Daten

Das Betriebsverhalten von Elektrofahrzeugen wird durch Analyse statistischer Daten konventioneller Fahrzeuge aus Studien abgeleitet und kombiniert mit fahrzeugspezifischen Informationen zu Batteriekapazität, Ladekennlinie und Anschlussleistungen der Ladeinfrastruktur. Ergänzt wird diese Modellierung um Messwerte von Elektrofahrzeugen, die in den Forschungsprojekten SmartWheels, E-Aix und Pendlerverkehr aufgenommen wurden (vgl. Abb. 4). Jeder Datenpunkt gibt hierbei die gemessene Geschwindigkeit eines Elektrofahrzeugs über einen Zeitraum von 8 Monaten mit 11 Fahrzeugen des Typs „FEV Liion Drive“ dar.

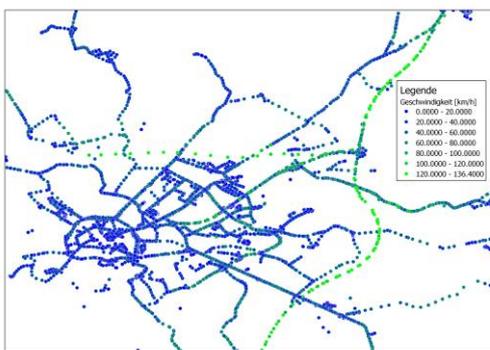


Abb. 4: Geschwindigkeitsprofil eines Elektrofahrzeugs in Aachen

Modellierung von Verteilungsnetzstrukturen

Dem IFHT liegen inzwischen mehrere hundert Netze der Mittel- und Niederspannungsebene aus städtischen, vorstädtischen und ländlichen Gebietstypen unterschiedlicher Verteilungsnetzbetreiber vor. Die örtliche Auflösung ist dabei so hoch, dass jeder Netzknoten ein Anschlussobjekt (beispielsweise einen Privathaushalt) repräsentiert, für den der Jahresenergiebedarf zugeordnet werden kann (in Abb. 5 durch die Größe der Kreise repräsentiert). Die Leistungstragfähigkeit der Betriebsmittel ist in Abb. 5 farblich kodiert.

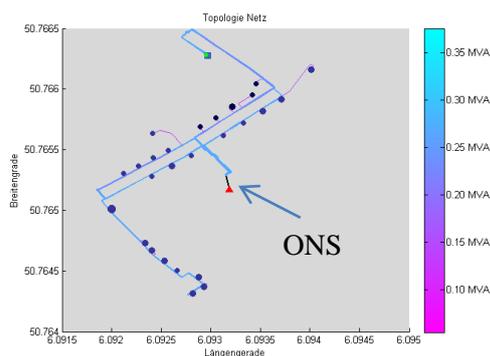


Abb. 5: Städtisches Verteilungsnetz

Das Ergebnis der probabilistischen Lastflussrechnung in Bezug auf die Betriebsmittelauslastung ist exemplarisch in Abb. 6 für ein Wohngebiet dargestellt, in dem die Ortsnetzstation (ONS) zu ca. 50% ausge-

lastet, die Kabel hingegen ortsabhängig mit 5 bis 30% ihrer Kapazität belastet werden.

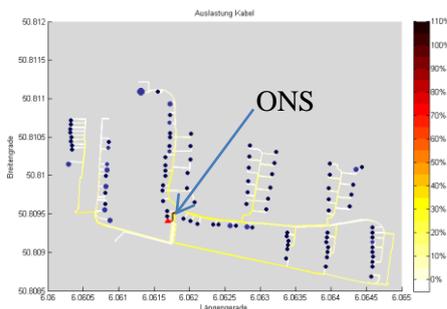


Abb. 6: Wohngebiet mit Betriebsmittelauslastung

Um Aussagen nicht nur über einzelne Verteilungsnetze, sondern über typische ländliche, vorstädtische oder städtische Verteilungsnetzstrukturen machen zu können, kommen zusätzlich synthetische Niederspannungsnetze zum Einsatz [2].

Probabilistische Methoden zur Verteilungsnetzbewertung

Um die Belastung von Verteilungsnetzen durch probabilistisch modellierte Last- und Erzeugungseinheiten bewerten zu können, müssen die Ergebnisse der Lastflussrechnung in geeigneter Weise interpretiert werden. Im Rahmen einer Variationsrechnung werden hierbei den Netzknoten probabilistische Last- und Erzeugungsprofile zugeordnet, so dass jeder Zeitpunkt mehrere 100 Mal simuliert wird. Abb. 7 zeigt die Belastung des Transformators für einen Simulationsdurchlauf mit 1000 Wiederholungen für einen Sommer-Werktag in 15-minütiger Auflösung in Form eines Histogramms für das in Abb. 6 gezeigte Netz.

In den frühen Morgenstunden ist die Belastung des Transformators gering. Im diesen Zeitraum ist auch die Streuung der Simulationsergebnisse gering, da die Haushaltslastprofile im Bereich der Grundlast nur wenig streuen. Die Streuung ist jedoch zu Zeiten höherer Last größer, da dort die

Einschaltwahrscheinlichkeiten vieler Geräte des zugeordneten Geräteparks höher sind.

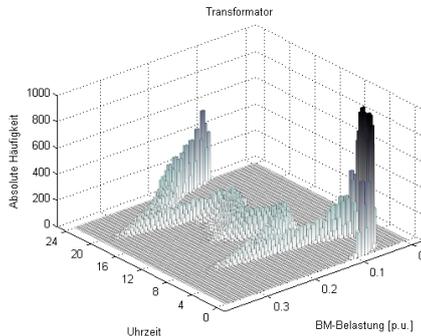


Abb. 7: Auslastungsverteilung eines Transformators eines Sommer-Werktags über der Zeit

Unter Berücksichtigung spezifischer Überlastfähigkeiten der Betriebsmittel eines Netzbetreibers kommen bei der Interpretation der Ergebnisse zu jedem Zeitpunkt unterschiedliche Quantile zum Einsatz, die die maximale Belastung des Betriebsmittels zu diesem Zeitpunkt beschreiben. Netzbetreiberabhängig kommen hier für die Betriebsmittelbelastungen 95%-Quantile und für die Spannungshaltung die Spannungsbänder zum Einsatz, die sich aus den 5%- und 95%-Quantilen der Knotenspannungen ergeben [3].

Zusammenfassung

Mit Hilfe der probabilistischen Modellierung von Lasten und Erzeugern sowie einer großen Anzahl an realen und synthetisch erzeugten Verteilungsnetzen wurde eine Methodik entwickelt, mit deren Hilfe derzeitige und zukünftige Verteilungsnetz-zustände bewertet werden können. Mit Hilfe einer großen Anzahl an Nieder- und Mittelspannungsnetzen kann die Anwendung der probabilistischen Methodik dazu dienen, die Auswirkung verschiedener (zukünftiger) Lasten und Erzeuger auf typisierte Verteilungsnetzstrukturen zu untersuchen und im Sinne von Netzausbaustra-

tegien technisch, ökonomisch und ökologisch zu bewerten.

Quellen

- [1] T. Smolka, T. Dederichs, M. Gödde, A. Schnettler: Potentiale und Rahmenbedingungen für einen flächendeckenden Einsatz von Smart Metering für Stadtwerke, Internationaler ETG-Kongress, Würzburg 2011
- [2] C. Matrose, P. Erlinghagen, T. Pollok: Generierung synthetischer Nieder- und Mittelspannungsnetzmodelle, in: A. Schnettler: Jahresbericht 2010, Institut für Hochspannungstechnik, Aachen 2010
- [3] T. Helmschrott, M. Gödde, E. Szczechowicz, C. Matrose, A. Schnettler: Methodical approach for analyzing the impact of a mass introduction of electric vehicles on the electricity networks in Europe, Power and Energy Conference Illinois 2012

Kontakt

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Markus Gödde
 goedde@ifht.rwth-aachen.de
 +49 (241) 80-93040

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

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

Flexibilitätsbewertung verteilter Energiespeichersysteme in Verteilungsnetzen

Die Einspeisung elektrischer Energie aus regenerativen Quellen erfolgt in Deutschland heute fast ausschließlich im durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz regulierten Umfeld ohne Berücksichtigung der Energiemärkte und den Anforderungen der elektrischen Netze. Sie erreichen zunehmend kritische Situationen, die entweder eine vorübergehende Drosselung der Anlagen oder in der längerfristigen Konsequenz Netzausbau zur Folge haben. Die Nutzung vorliegender Flexibilitäten beim Betrieb dezentraler Anlagen auf Verteilungsnetzebene kann einen Beitrag zur markt- und netzorientierten Integration regenerativer Energien führen. In diesem Kontext sind geeignete Konzepte für eine systemkonforme Integration zu eruiieren und unterschiedliche dezentrale Anlagen hinsichtlich ihrer technologischen Möglichkeiten zu untersuchen.

Einleitung und Motivation

Strom aus regenerativen Quellen hat an der deutschen Stromversorgung einen Anteil von über 20%. Wesentliche Stütze ist das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), welches dem Anlagenbetreiber garantierte Einspeisetarife sowie die Abnahme der Energie durch den Netzbetreiber garantiert. Bis heute sind damit dargebotsabhängige Einspeiser abgesehen von der Direktvermarktung ohne Beeinflussung der Erzeugung von den Elektrizitätsmärkten entkoppelt. Mittelfristig scheint jedoch eine bedarfsorientierte Einbindung von Erzeugungseinheiten, wie Windkraft- und Photovoltaikanlagen, insbesondere bei weiter steigender Durchdringung notwendig.

Die Nutzung von Flexibilitäten zur verbesserten Markt- und Netzintegration von regenerativen Energien werden derzeit vielfach als Alternative zum Netzausbau diskutiert. Flexibilitäten auf der Verteilungsebene können im Besonderen durch eine gezielt angepasste Fahrweise dezentraler Technologien – vornehmlich mit Speichern – sowie emergente Technologiekonzepte, z.B. virtuelle Kraftwerke erzielt und für unterschiedliche Anwendungsfelder genutzt werden. Letzte zeichnen sich im Vergleich zu konventionellen Kraftwerken

durch eine schnell anpassbare Fahrweise aus und können demnach sehr flexibel auf vorgegebene Änderungen reagieren. Insbesondere vor dem Hintergrund der mit der Integration regenerativen Energien einhergehenden Implikation auf die elektrischen Netze [1] können verfügbare Flexibilitäten unter anderem dazu genutzt werden, eine markt- und netzorientierte Einspeisung aus diesen Quellen zu forcieren. Neben der Marktintegration wird daher auch über die Beeinflussung von Lastflüssen als Alternative zum Netzausbau im Rahmen der Netzintegration diskutiert, jedoch aufgrund des unklaren regulatorischen Umfeldes im Interessenskonflikt von Anlagen- und Netzbetreiber und dem Betreiber der Einrichtung, die die Flexibilität bereitstellt, nicht weiter dargestellt.

Darüber hinaus kann die Nutzung vorliegender Flexibilitäten beim Betrieb dezentraler Anlagen auf Verteilungsnetzebene für dezidierte Geschäftsmodelle vorgenommen werden. Neben der bedarfsgerechten Erzeugung aus regenerativen Quellen ist der Handel an Fahrplan- und Regelleistungsmärkten möglich. Hierbei liegt der Fokus auf der Maximierung des eigenen Deckungsbeitrags. Ebenso können Dienstleistungen in Form von Spannungshaltung oder der Aufschiebung von Netzausbauten

durch eine gezielte Einsatzweise erreicht werden. Zusätzlich zur Spannungshaltung und Vermeidung von Netzausbauten, falls durch regenerative Energien induziert, ist das Vermeiden von Einspeisemanagement im Falle von Netzengpässen nach §12 EEG eine der Hauptaufgaben. Darüber hinaus wird der Einsatz in Inselnetzen und Microgrids diskutiert.

Technisch betrachtet können die aufgezeigten Einsatzfelder auch in einer multifunktionalen Betriebsweise kombiniert bedient werden. Dies hängt jedoch maßgeblich vom regulatorischen Rahmen ab. [5]

Relevante Technologien

Neben stationären Batteriespeichern als Technologie mit der größten Flexibilität werden zunächst aufgrund künftig erwarteter Durchdringungsraten Elektrofahrzeuge und thermische Speicher in Kombination mit netzgekoppelten Wärmeerzeugern betrachtet [2], [4].

Stationäre Speichertechnologien in Verteilungsnetzen können in die Kategorien lokale Kleinspeicher und stationäre Großbatteriespeicher klassifiziert werden [3]. Sie besitzen im Vergleich zu der thermischen und elektromobilen Speicherung die höchste Flexibilität, da sie keinem primären Einsatzzweck wie der Wärmebereitstellung oder der Mobilität dienen. Charakteristische Größen zur Beschreibung der Technologien sind insbesondere die Lade- und Entladeleistung, die Kapazität, der Wirkungsgrad und die Zyklenlebensdauer. Bei lokalen Kleinspeichern im kW-Bereich, die beispielsweise in Haushalten eingesetzt werden können, wird heute vornehmlich auf die Lithium-Ionen Technologie oder auf Blei-Säure Batterien gesetzt [3]. Zu den stationären Großspeichern im höheren kW- bis zum zweistelligen MW-Bereich gehören die Natrium-Schwefel Batterie, die Redox-Flow Batterie und wiederum die

Lithium-Ionen und Blei-Säure Technik. Letztere gelten als ausgereifte Technologie, jedoch finden weltweit Demonstrations- und erste kommerzielle Projekte mit allen oben aufgeführten Technologien statt. Gegenüber anderen Speichertechnologien haben Batteriespeicher einen relativ hohen Wirkungsgrad von 70 bis über 90% [3].

Weitere Technologien wie Elektrofahrzeuge, elektrische Speicherheizungen und Wärmepumpen können durch Aufnahme zusätzlicher Restriktionen insbesondere zur zeitlichen Verfügbarkeit ebenfalls in das Modell aufgenommen werden.

Methodik zur Bewertung

Trotz dynamischer technologischer Entwicklung einiger Speichertechnologien bleiben die Investitionskosten hoch, so dass der Einsatz für eine einzelne Applikation wie z.B. die Ausnutzung der Preisdifferenzen innerhalb eines Tages oft nicht wirtschaftlich ist. Die Anforderungen an eine adäquate Bewertung von Speichertechnologien umfassen deshalb erstens die Modellierung eines multifunktionalen Einsatzes von Speichertechnologien auf den existierenden Elektrizitätsmärkten und für die verschiedenen netzorientierten Anwendungen mit dem Ziel der Erlösmaximierung. Zweitens müssen ihre wesentlichen technischen Charakteristika erfasst werden und drittens ist es für die Quantifizierung des Erlöses die Eigenschaften der jeweiligen Märkte abzubilden, wozu verschiedene Produktzeitschreiben, Ausschreibungszeiträume, Mindestlosgrößen und Verfügbarkeitsanforderungen gehören. Im Folgenden wird ein in der Forschungsgruppe entwickeltes Speichereinsatzmodell mit dem Fokus auf marktorientierte Anwendungen vorgestellt.

Als Modellierungsrahmen wird ein unabhängiger Speicherbetreiber betrachtet, der das Ziel verfolgt, seinen Speicher erlösma-

ximierend auf dem EPEX-Spotmarkt und auf den deutschen Regelenergiemärkten, wozu der Primär-, der Sekundär- und der Minutenreservemarkt gehören, zu positionieren. Es wird zudem die Möglichkeit geboten, Strom aus regenerativen Energien, der nach §12 EEG gedrosselt werden würde, zwischen zu speichern. Zusätzlich werden Intradaymärkte als Möglichkeit genutzt, um nicht prognostizierbare Regelenergieabrufen zu kompensieren.

Das dem Modell zugrunde liegende Optimierungsverfahren ist die gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung (GGLP). Sie hat den Vorteil, dass der Entscheidungsvektor (1) mit den Entscheidungsvariablen x und y sowohl aus reellen als auch ganzzahligen Variablen bestehen kann. Ganzzahlige Variablen sind insbesondere für die Abbildung der Markteigenschaften wie Angebotsinkremente oder die Modellierung von stückweise linearen Entscheidungsräumen notwendig. Das allgemeine Optimierungsproblem kann wie folgt formuliert werden:

$$\min c^T * x + d^T * y \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad A * x + B * y \leq b \quad (2)$$

$$x \geq 0 \quad (3)$$

$$x \in \mathbb{R}^n; n \in \mathbb{N}; y \in \mathbb{Z}^p; p \in \mathbb{N} \quad (4)$$

Bevor der Optimierungskern beschrieben wird, werden die Input- und Outputgrößen erläutert. Die für die Modellierung von Speichertechnologien typischen Eingangsgrößen umfassen die Leistung P , die Energiekapazität W , den Einspeisewirkungsgrad η_E , den Ausspeicherwirkungsgrad η_A , die Zyklenlebensdauer und die technische Lebensdauer. Der Output des Optimierungsmodells besteht aus dem Vektor $x_{t,m}$, der die Lade- oder Entladeleistung in einem Zeitintervall t auf einem Markt m beschreibt.

Die Zielfunktion des Optimierungsmodells (5) wird folgendermaßen dargestellt:

$$\max \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M R_{t,m} * x_{t,m} \quad (5)$$

Es erfolgt eine Maximierung der Erlössumme auf allen Märkten M mit $R_{t,m}$ als Erlös in Stunde t auf dem Markt m per MW Leistung.

Der Zeitschritt Z wurde zunächst zu einer Stunde gewählt. Die wichtigsten Modellrestriktionen stellen die Kapazitätsrestriktion (6) und die Einhaltung der maximalen Leistung dar (7).

$$\begin{aligned} 0 &\leq \frac{1}{\eta_A} * \left(\sum_{\tau=1}^t \sum_m x_{\tau,m} \right) - \eta_E \\ &\quad * \left(\sum_{\tau=1}^t \sum_m x_{\tau,m} \right) \quad (6) \\ &\leq W_{max,t} * \frac{1}{Z} \quad \forall t \\ &\in \{1 \dots T\} \end{aligned}$$

$$\sum_m x_{t,m} \leq P_{A,max} \quad \forall t \in \{1 \dots T\} \quad (7)$$

Die Partizipation auf Regelenergiemärkten erfordert bei Leistungsvorhaltung durch einen Energiespeicher die Blockung der Speicherkapazität für den angebotenen Zeitraum der Leistungsvorhaltung, da Abrufe nicht prognostiziert werden können und im ungünstigsten Fall den gesamten Zeitraum andauern können. Dies ist in Gleichung (6) noch nicht berücksichtigt, wird aber durch die Implementierung einer Speicherblockung erreicht, die in Abbildung 1 exemplarisch dargestellt ist. Weiterhin zu berücksichtigen sind technologische Eigenschaften und Restriktionen, die beispielhaft aus dem Wärmebedarf eines Wohngebäudes oder ebenso aus dem Bedarf nach Mobilität bei Elektrofahrzeugen resultieren und entsprechend die Blockung beeinflussen.

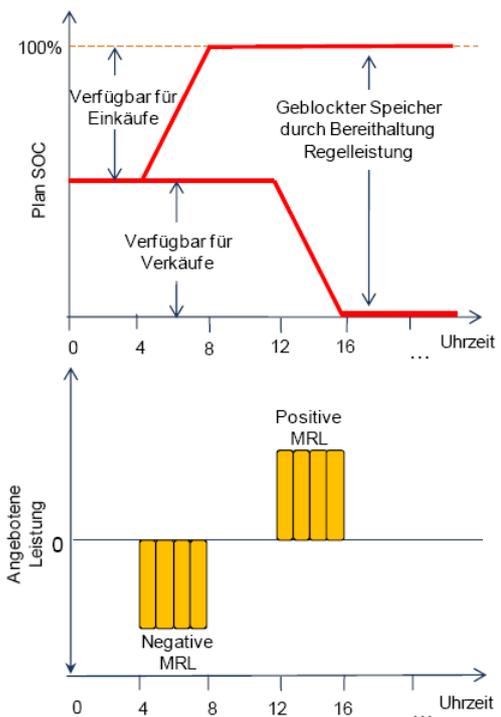


Abb. 1: Blockung des Speicher

Gleichung (8) zeigt beispielhaft die markttechnische Restriktion, die notwendig ist um vierstündige Produktblöcke beim Minutenreservermarkt zu modellieren.

$$x_{t,m} = x_{t+1,m} = x_{t+2,m} = x_{t+3,m} \quad (8)$$

$$\forall t \in \{1,5,9,13, \dots, T-3\},$$

Alle anderen relevanten Markteigenschaften und technische Restriktionen werden auf ähnliche Art und Weise modelliert und werden durch Restriktion (2) sowohl unter Nutzung der Gleichheits- als auch der Ungleichheitsnebenbedingungen. Die Optimierung wird für ein ganzes Jahr mit rollierenden wöchentlichen Optimierungszyklen durchgeführt, die sich aus den aktuell gültigen Angebotszeiträumen für Sekundärregelleistung und Primärregelleistung ableiten. Die wöchentliche Speichereinsatzoptimierung besteht dabei aus vier Stufen, die den unterschiedlichen zeitlichen Planungshorizonten bei der Angebotslegung und dem Zuschlag auf den drei Regellenergie-

märkten entsprechen, so dass eine detailgetreue Abbildung erreicht wird.

Exemplarisches Beispiel

Um die Unterschiede in der Flexibilität verschiedener Technologien aufzuzeigen, ist exemplarisch ein stationärer Batteriespeicher im Markteinsatz dargestellt. Als Märkte wurden der EPEX-Spotmarkt mit Preisen aus dem Jahr 2009 und der Minutenreservermarkt mit durchschnittlichen Preisniveaus aus den Jahren 2008-2010 gewählt. Dem angeschlossen sind Überlegungen zum Einsatz von Wärmeerzeugern.

Im Folgenden wird ein beispielhafter Speichereinsatz für einen ausgewählten Tag mit perfekter Voraussicht vorgestellt, an dem aufgrund von Netzengpässen Windenergie gedrosselt werden musste. Der obere Teil von Abbildung 2 verdeutlicht dabei den Verlauf des Spotmarktpreises an diesem Tag in €/MWh. Im unteren Teil wird die gedrosselte Windleistung in MW gezeigt.

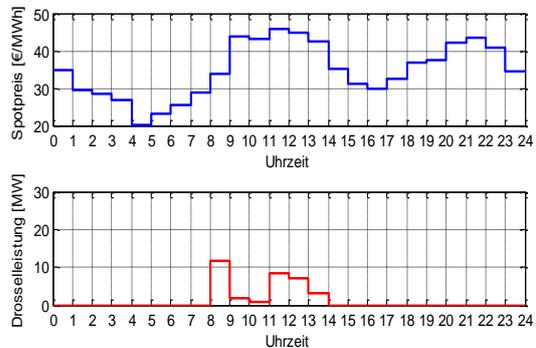


Abb. 2: EPEX-Spotmarkt-Preisverlauf und gedrosselte Windenergie am selben Tag

Auf Basis der dargestellten Daten wurde für einen Tag der Einsatz eines Batteriespeichers mit einer Leistung von 20 MW und 120 MWh optimiert. Es wurden die Parameter einer Natrium-Schwefel-Batterie zugrunde gelegt. Abbildung 3 verdeutlicht das Ergebnis der optimierten Fahrweise, wobei Verkaufsgeschäfte auf der positiven

und Einkaufsgeschäfte auf der negativen Achse dargestellt wurden.

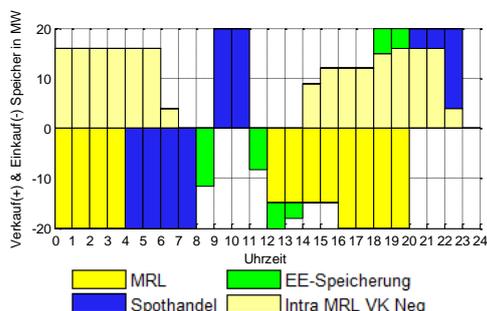


Abb. 3: Beispielhafte Fahrweise Speicher
 Zunächst ist zu erkennen, dass Spotmarkt-Einkäufe zwischen 4 und 8 Uhr wie erwartet in günstigen Stunden getätigt wurden, während Spotmarktverkäufe tendenziell zu Hochpreisen erfolgt sind. Die als kostenfrei angeommene Speicherung von ansonsten gedrosselter Windenergie ist nahezu vollständig erfolgt. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Partizipation am negativen Minutenreservemarkt (MRL), charakterisiert durch die angebotenen Vier-Stunden-Blöcke erfolgt ist und den Spotmarkt von 0 bis 4 Uhr und von 12 bis 20 Uhr verdrängt hat. Zur Kompensation der Abrufunsicherheit am Minutenreservemarkt agiert der Speicher zudem auf dem Intradaymarkt (Intra MRL VK Neg).

Eine Marktpartizipation wie oben dargestellt ist prinzipiell auch mit thermischen Speichereinheiten möglich. Aufgrund der primären Applikation von Nachtspeicherheizungen oder Wärmepumpen mit thermischem Speicher zur Wärmebereitstellung werden eine geringere Flexibilität und damit auch niedrigere Gesamterlöse an Elektrizitätsmärkten erwartet. Insbesondere im Sommer ist – abgesehen von Sonderkunden wie beheizten Freibädern – die Flexibilität aufgrund eines niedrigen Wärmebedarfs sehr niedrig. Da in der Betriebsstrategie neben der Identifikation von geeigneten Regelenergieprodukten die Deckung des Wärmebedarfs und anlagenspezifische

technische Restriktionen Berücksichtigung finden muss, steigt auch die Komplexität des Optimierungsproblems. Die zusätzlichen Restriktionen des Wärmebedarfs besitzen einen ambivalenten Einfluss auf die Deckungsbeiträge. Nur solange die Ladeleistung nicht in Konkurrenz zur vermarkteten Regelleistung tritt, kann die Vermarktung aus Sicht eines Haushaltes deckungsbeitragserhöhend wirken.

Fazit und Ausblick

In der Forschungsgruppe wurden sowohl Modelle für den Einsatz von hoch-flexiblen Speichern wie Batteriespeichern auf Elektrizitätsmärkten und in elektrischen Netzen als auch Modelle für Speicher mit geringerer Flexibilität aufgrund primärem Einsatz im Wärme- oder Mobilitätssektor entwickelt.

Die Nutzung von Flexibilitäten im Verteilungsnetzbereich versetzt die Stromerzeugung aus regenerativen Quellen in die Lage, wirtschaftlich in die Märkte für Fahrplanenergie und Systemdienstleistungen eingebunden zu werden. Auf der anderen Seite kann z.B. durch die vorübergehende Speicherung von nicht transportierbarem Strom die Netzintegration der regenerativen unterstützt werden. Allerdings sind für die Anwendung der netzorientierten Nutzung die regulatorischen Rahmenbedingungen nicht derzeit nichtgegeben.

Der Zielkonflikt zwischen der Marktintegration regenerativer Quellen und netzstützenden Nutzung der Flexibilitäten ist ebenso Gegenstand künftiger Untersuchungen wie die Ausweitung dieser Konzepte auf mögliche Verbünde vieler solcher Anlagen mit unterschiedlichen Technologien.

Literatur

- [1] C. Matrose, M. Peitz, A. Schnettler, A. Hinz: Increasing Demand for Voltage control in Secondary Substations, Paper 297, CIRED Workshop 2012, Lissabon
- [2] Nationale Plattform Elektromobilität (NPE): Zwischenbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität, Berlin, November 2010]
- [3] C. Dötsch et al.: „Energiespeicher“, in: Energietechnologien 2050 – Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung, Politikbericht, 2009.
- [4] S. Kregel, S. Doroudian, A. Schnettler: Modelling Approach to Assess the Impact of Heat and Electricity Storage on Distribution Systems, International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2011), Frankfurt, 6.-9. Juni 2011
- [5] B. Wasowicz, S. Koopmann, T. Dederichs, A. Schnettler, U. Spaetling: Evaluating regulatory and market frameworks for energy storage deployment in electricity grids with high renewable energy penetration, 9th International Conference on the European Energy Market, Florenz 2012.

Kontakt

Thomas Pollok, MSc
 pollok@ifht.rwth-aachen.de
 +49 241 80 94958
 Dipl.-Ing. Stefan Kregel
 kregel@ifht.rwth-aachen.de
 +49 241 80 93034
 Dipl.-Wirt.-Ing. Alexander Stroband
 stroband@ifht.rwth-aachen.de
 +49 241 80 90013
 Dipl.-Wirt.-Ing. Bartholomäus Wasowicz
 wasowicz@ifht.rwth-aachen.de
 +49 241 80 94912

Simulatorische Analyse und Optimierung von Asset Management Strategien im regulierten Umfeld der Elektrizitätsversorgung

Dissertation: Dipl.-Ing. Christian Hille
Tag der mündlichen Prüfung: 22. Dezember 2011
Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Armin Schnettler
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Balzer

Das Asset Management von Netzbetreibern gewinnt im Rahmen eines regulierten jedoch liberalisierten Marktes an Bedeutung, da viele Entscheidungen einen direkten Einfluss auf die Unternehmenserlöse haben. Die Anreizformel der Anreizregulierungsverordnung stellt hierbei eine zentrale Optimierungsvorschrift dar, die aber für Verteil- und Transportnetzbetreiber unterschiedliche Ausprägungen aufweist. Im Rahmen der Dissertation wurden Methoden entwickelt und durch Simulationen umgesetzt, um die komplexen Wechselwirkungen zwischen Entscheidungen des Asset Managements und der daraus resultierenden Netzqualität sowie den Unternehmenserlösen abbilden zu können.

Einleitung und Motivation

Das Asset Management bei Netzbetreibern beschäftigt sich mit der Bewirtschaftung der Netze. Es werden unter anderem die Entscheidungen zur Instandhaltung und Erneuerung der Kernsubstanz - der Betriebsmittel - getroffen. Maßgebliches Ziel ist hier von Seiten des Asset Owner eine Renditemaximierung. Die Minimierung der Gesamtkosten aus präventiver Instandhaltung, Instandsetzung nach Störungseignissen und Ersatz von Komponenten ist die wichtigste Optimierungsgröße.

Die Zusammenhänge sind komplex und bedürfen komponentennaher Modellbildung zur Ableitung belastbarer Aussagen. Modellbildung sowie Simulation der Auswirkungen von Entscheidungen des Asset Managements auf Netzqualität und Unternehmenserlöse sind wesentliches Ziel der Dissertation.

Anreizregulierung

Seit 2009 gilt in Deutschland die Anreizregulierungsverordnung (ARegV), welche anhand eines Effizienzvergleichs mittels Input-Output-Relation einen marktähnlichen Kostendruck auf Netzbetreiber ausüben soll. Hierbei steht die Reduktion von Ineffizienzen im Vordergrund. Als ineffizient gelten in diesem Zusammenhang Kosten, welche ein Netzbetreiber ansetzt, jedoch ein vergleichbarer Netzbetreiber nicht zum Betrieb des Netzes aufwenden müsste.

Zentrales Element der ARegV ist die Anreizformel, welche qualitativ in Formel 1 dargestellt ist. Mittels dieser Formel wird die Obergrenze der gesamten Unternehmenserlöse – die Erlösobergrenze *EO* – ermittelt und es wird somit mittelbar auf die Netznutzungsentgelte eingewirkt. Die qualitative Darstellung in Formel 1 zeigt

den Zusammenhang aus Kosten K , der Effizienz $E (\leq 1)$ und der monetarisierten Netzqualität Q . Letztere gilt ab dem 1.1.2012 und ist aktuell nur für Verteilungsnetzbetreiber definiert. Der Einbezug der Netzqualität soll einer rein kostenorientierten Optimierung ohne Berücksichtigung der kundenorientierten Versorgungsqualität entgegenwirken.

$$EO = K \cdot E \pm Q$$

Formel 1: Anreizformel

Die Anreizregulierung stellt also einen volkswirtschaftlich orientierten Rahmen dar, in welchem die betriebswirtschaftlichen Aspekte seitens der Netzbetreiber eingegliedert werden müssen.

Asset Simulation für Verteilungsnetzbetreiber

Für Verteilungsnetzbetreiber stellt die Anreizformel inkl. Qualitätsregulierung die mathematische Optimierungsfunktion dar. Sie beinhaltet die beiden wichtigsten Kenngrößen Kosten und Netzqualität auf monetärer Basis. Ziel ist somit eine maximale Differenz aus Erlösobergrenze (mögliche Erlöse) und Kosten. Der allgemeine Zusammenhang lässt sich qualitativ wie in Abb. 1 gezeigt darstellen.

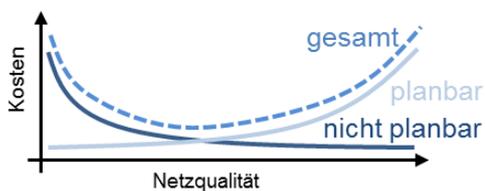


Abb. 1: Qualitativer Zusammenhang aus Kosten und Netzqualität

Die Gesamtkosten setzen sich aus planbaren (deterministischen) und nicht planbaren (stochastischen) Kosten zusammen. Die planbaren Kosten beinhalten in dieser Betrachtung die Aufwendungen für präventi-

ve Instandhaltung und Erneuerung des Netzes. Die stochastischen Kosten entstehen durch nicht erwartete Störungsereignisse und deren Instandsetzungsaufwand.

Im Rahmen der Anreizregulierung für Verteilungsnetzbetreiber wird diesen Gesamtkosten ein qualitätsabhängiger Zu- bzw. Abschlag auf die Erlösobergrenze angerechnet. Hiermit erfahren die stochastischen Kosten eine höhere Gewichtung bzw. Bepreisung.

Der Zusammenhang aus Instandhaltung und Störungsereignissen und daraus folgender Netzqualität ist nicht linear abbildbar. Im Rahmen der Dissertation ist daher ein Verfahren entwickelt worden, welches es ermöglicht, die Störungshäufigkeit spezifischer Betriebsmittel im Verteilungsnetz instandhaltungsabhängig zu ermitteln. Das Verfahren beruht auf der Auswertung von Störungsdaten verschiedener Verteilungsnetzbetreiber durch die FGH e.V.. Die Modellbildung setzt maßgeblich auf einen exponentiellen Verlauf der Störungshäufigkeit über dem Betriebsalter sowie auf eine Abhängigkeit des Exponenten der zugrundeliegenden Funktion vom präventiven Instandhaltungsaufwand. Abb. 2 zeigt diesen Sachverhalt qualitativ.

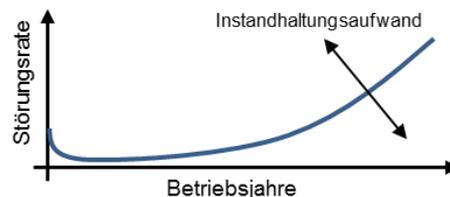


Abb. 2: Modellierung instandhaltungsabhängiger Störungsrate

Aus der Kombination der instandhaltungsabhängigen Störungsrate relevanter Betriebsmittel im Verteilungsnetz lässt sich eine in Bezug auf einen Referenzwert abweichende Netzqualität je nach Instandhaltungsstrategie ermitteln.

Das hierzu geschaffene Simulationstool ermittelt ausgehend von der Instandhaltungsstrategie die deterministischen und stochastischen Kosten sowie die Versorgungszuverlässigkeit (s. Abb. 3).

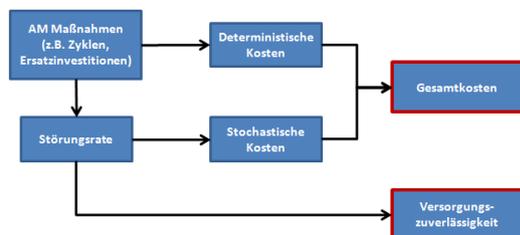


Abb. 3: Zusammenhand von Instandhaltungsstrategie und Kosten bzw. Zuverlässigkeit

Mittels Gesamtkosten und Versorgungsqualität ergibt sich durch Anwendung der Anreizformel die Erlösobergrenze für einen entsprechenden Netzbetreiber.

Ergebnisse für ein Beispielnetz belegen, dass durch die Anreizregulierung inkl. Q-Element ein realer Anreiz für Netzbetreiber besteht, die Netzqualität auf einem konstanten Level zu halten. Die damit durchgeführte kundenbezogene Qualitätsregulierung greift.

Verfügbarkeitsorientierte Instandhaltung im Transportnetz

Für Transportnetzbetreiber gilt die in Formel 1 qualitativ skizzierte Anreizformel ohne Qualitätselement. Das bedeutet, dass für Transportnetzbetreiber die Kostenreduktion im Vordergrund steht und nur nachrangig die Versorgungsqualität berücksichtigt wird. Die Asset Owner vieler deutscher Transportnetze sind zudem stark renditeorientierte Unternehmen, wodurch das früher gängige Umlageverfahren keine Anwendung mehr findet und der zuvor genannte Aspekt noch verstärkt wird.

Im Bereich der Instandhaltung sind somit Kostenminimierungen zu erwarten. Hier

gilt es neue Strategien zu entwickeln, um eine Kostenreduktion durch Effizienzsteigerung und nicht durch Qualitätsminderung herbeizuführen.

Bislang geschieht die Instandhaltung im Transportnetz vielfach zyklisch und betriebsmittelspezifisch. D.h. in festen Zeitintervallen wird jedes Betriebsmittel inspiziert bzw. gewartet. Es kann also sein, dass in einem Schaltfeld in einem Jahr der Leistungsschalter gewartet wird und im nächsten Jahr zwei Trennschalter, danach ein Wandler und so weiter. Hierbei werden die häufigen Freischaltungen von Schaltfeldern oder Schaltanlagen sowie die Anfahrts- und Rüstzeiten nicht ausreichend minimiert. Zielführender wäre eine kombinierte Instandhaltung aller Betriebsmittel, welche zur Instandhaltung eines Einzelnen freigeschaltet werden müssten.

Eine Beurteilung der Effizienz solcher Maßnahmen, wie auch der daraus resultierenden Netzqualität ist jedoch bislang nicht geschlossen möglich. Aus diesem Grund wurde in der Dissertation ein Verfahren entwickelt, welches basierend auf instandhaltungsabhängigen Störungsdaten die Nichtverfügbarkeit von Abgängen in Schaltanlagen ermittelt.

Grundlage hierzu ist erneut die Bestimmung von betriebsmittelspezifischen Störungsdaten in Abhängigkeit von der gewählten Instandhaltungsstrategie. Die Komplexität und Relevanz der Betriebsmittel im Transportnetz ist deutlich höher als im Verteilungsnetz. Die damit einhergehende bessere Beobachtbarkeit und Datenerhebung ermöglicht für die Berechnung der Störungsdaten den Einsatz des am IFHT entwickelten m2M-Modells [1].

Es ist jedoch festzuhalten, dass im Rahmen von Zuverlässigkeitsbetrachtungen eine reine Analyse von Störungshäufigkeiten,

wie sie im Rahmen der Berechnung von Störungsdaten Anwendung findet, nicht ausreichend ist. Aus diesem Grund wurde im Rahmen der Dissertation eine neue Größe entwickelt: Die störungs- bzw. instandhaltungsbedingte Nichtverfügbarkeitsrate. Diese Größe gibt an, wie lange ein Betriebsmittel im Mittel pro Jahr nicht in Betrieb ist.

Grund für diesen Nichtbetrieb können Störungs- und damit verbundene Reparaturereignisse sein. Aus den in Abb. 2 beispielhaft skizzierten Störungsdaten entwickeln sich also durch zusätzliche Betrachtung der störungsbedingten Reparaturdauern die störungsbedingten Nichtverfügbarkeitsraten. Abb. 4. zeigt dies exemplarisch für zwei Leistungsschalter. Einen 245 kV und einen 420 kV Pufferschalter.

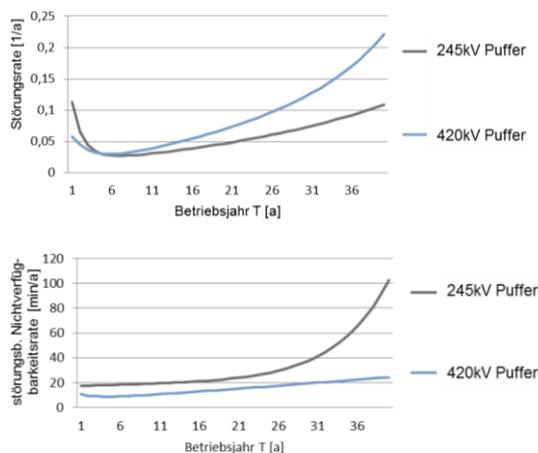


Abb. 4: Störungsrate und störungsbedingte Nichtverfügbarkeit für Leistungsschalter

Es ist erkennbar, dass in der störungsbedingten Nichtverfügbarkeitsrate im Gegensatz zur Störungsrate keine „Kinderkrankheiten“ erkennbar sind. Dies liegt an der relativ kurzen Reparaturzeit von Störungen zum Betriebsbeginn. Es ist außerdem zu erkennen, dass der 245 kV Pufferschalter bei reiner Betrachtung der Störungsrate „besser“ als der 420 kV Schalter ist. Die störungsbedingte Nichtverfügbarkeit zeigt das Gegenteil. Es ist somit festzuhalten,

dass der Informationszugewinn durch zusätzliche Betrachtung der Reparaturdauern einen Vorteil bei der Analyse von Instandhaltungsstrategien bietet.

Ausgehend von den instandhaltungsabhängigen Nichtverfügbarkeitsraten kann anschließend, mittels Minimalschnittverfahren, ein Rückschluss auf die Nichtverfügbarkeit von einzelnen Abgängen in Schaltanlagen erfolgen. Hierzu wird das Single-Line Diagramm einer Schaltanlage in einen gerichteten Graphen überführt und das Minimalschnittverfahren ermöglicht eine Ermittlung von Ausfallhäufigkeiten und Dauern.

Die zusätzliche implementierte Simulationsumgebung erlaubt schaltanlagen-spezifische Analysen verschiedenster Instandhaltungsstrategien.

Insgesamt ist so eine Beurteilung der instandhaltungsabhängigen Zuverlässigkeit im Transportnetz möglich. Simulationen belegen, dass eine Reduktion des Instandhaltungsaufwandes durch feldweise Instandhaltung möglich ist, ohne die Netzqualität zu senken.

Quellen

- [1] Stefan Federlein: Modellierung des typspezifischen Störungsaufkommens von Hochspannungsschaltanlagen. Aachen: Verlagshaus Mainz GmbH, ISBN 3-86130-678-6, 2010.

Kontakt

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

Charakterisierung der dielektrischen Wiederverfestigung alternativer Löschgase in Isolierstoffdüsen

Dissertation: Dipl.-Ing. Andreas Kurz
Tag der mündlichen Prüfung: 19. Juli 2011
Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Armin Schnettler
Prof. Dr. Klaus Fröhlich

Im Rahmen einer nachhaltigen Energieversorgung der Zukunft ist es als wesentlich anzusehen, dass das derzeit fast ausschließlich verwendete Schalt- und Isoliergas Schwefelhexafluorid (SF_6) durch umweltfreundlichere Gase zu substituieren ist. Im Hinblick auf die dielektrischen Eigenschaften ergeben sich daraus für die Designer von Leistungsschaltern neue Herausforderungen. Diese liegen z. B. in der bislang noch weitestgehend unbekanntem Interaktion dieser Gase mit den Isolierstoffdüsen der Leistungsschalter, diese können auch einige Millisekunden nach der erfolgten Schaltheandlung noch heißes Gas emittieren. Diese Arbeit ermöglicht daher die Charakterisierung der dielektrischen Wiederverfestigung und ermöglicht durch eine Modellierung das Ableiten von wesentlichen Kriterien für das Design von zukünftigen Leistungsschaltern.

Einleitung und Motivation

Nach dem natürlichen Stromnulldurchgang, dem Zeitpunkt des Abschaltens eines Selbstblasleistungsschalters, sind zwei Phasen von herausragender Bedeutung. Dies sind die thermische Phase und die dielektrische Phase. Die dielektrische Phase schließt sich hierbei an die thermische Phase an und zwar erfolgt sie einige μs nachdem der Strom zu Null geworden ist. Zu diesem Zeitpunkt ist die dielektrische Festigkeit der Gasstrecke durch die hohen Temperaturen und die damit verbundenen Gaseigenschaften stark herabgesetzt und es besteht die erhöhte Gefahr eines elektrischen Durchschlags. Durch ein dielektrisches Versagen kann ein erneuter Stromfluss generiert werden und der Lichtbogen wieder zünden. Dieses Verhalten wird als dielektrisches Versagen bezeichnet und kann auch einige 100 μs nach dem Stromnulldurchgang erfolgen. Um diesem Pro-

zess entgegen zu wirken, müssen besondere Maßnahmen ergriffen werden. Zu diesen zählt beispielsweise eine möglichst starke Kühlung der Gasstrecke durch eine Beblausung. Darüber hinaus muss gewährleistet werden, dass die elektrischen Feldstärken innerhalb der Gasstrecke möglichst gering gehalten werden, um einen frühzeitigen Durchschlag während des Anstiegs der wiederkehrenden Spannung zu verhindern. Auch die Durchmischung des Löschgases und die damit verbundene Gaszusammensetzung gilt es zu berücksichtigen, da diese ebenfalls den Zeitpunkt des elektrischen Durchschlags beeinflussen können.

In diesem Zusammenhang ist es insbesondere wichtig, das Verhalten der Isolierstoffdüsen zu betrachten. Aus diesen kann nach dem Stromnulldurchgang noch Material in Form von heißem Gas ausdampfen und somit die Gaszusammensetzung und Gastemperatur beeinflussen. Diesem Effekt

kann vor allem dann eine besondere Bedeutung zukommen, wenn aufgrund des hohen Treibhauspotentials das momentan bevorzugt eingesetzte Löschgas SF_6 substituiert werden soll. Substitute für SF_6 weisen im Allgemeinen eine reduzierte dielektrische Festigkeit auf und ihr Verhalten nach einem Ausschaltvorgang ist weniger umfassend erforscht als das von SF_6 . Es ist jedoch bekannt, dass sich aufgrund des ausdampfenden Materials der Ort der Durchschlagentscheidung in einer unbelassenen Anordnung hin zur inneren Wand der Isolierstoffdüse verschieben kann [1].

Konzept der Untersuchungen

Zunächst ist es erforderlich Prüfkreise und Modellanordnungen zu konzeptionieren und zu realisieren, mit denen eine Charakterisierung der dielektrischen Wiederverfestigung erfolgen kann. Die Modellanordnungen ermöglichen neben der Bestimmung der Durchschlagspannungen optische Untersuchungen der Durchschlagpfade und eine Variation der Einflussparameter. In Abbildung 1 ist exemplarisch eine der betrachteten Anordnungen dargestellt. Zur experimentellen Bestimmung der Durchschlagspannung werden die Modellanordnungen zunächst mit einem Kurzschlussstrom belastet und nach dem verlöschen des Lichtbogens zu fest definierten Verzögerungszeiten mit einer Spannung beaufschlagt. Somit wird ein Datensatz gewonnen, der als Parameter den Strom I , die Lichtbogenspannung U_{Libo} , die Durchschlagspannung U_{BD} , den Druckaufbau im Heizvolumen Δp_H , den Druckaufbau in den Isolierstoffdüsen Δp_D , die Temperatur der Düsenwand T_{Wand} , den im Einzelfall erzeugten Volumenstrom V_{St} , die abgebrannten Massen der Isolierstoffdüsen Δm , die Position des Durchschlagpfades sowie die

geometrischen Daten der Modellanordnung enthält.

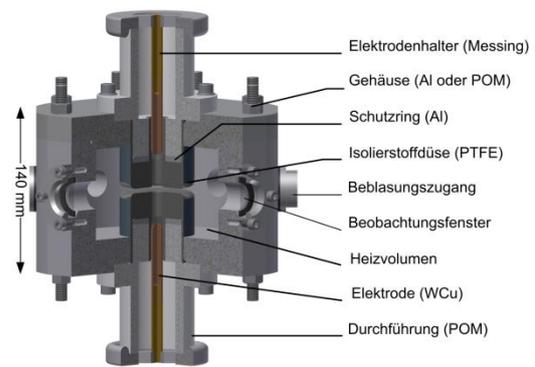


Abb 1: Exemplarische Beschreibung einer Modellanordnung

Anschließend erfolgt die Modellbildung. Zur Bestimmung der für die Modellierung relevanten Eingangsgrößen werden sowohl eigenen Modelle entwickelt als auch kommerzielle Berechnungstools (z. B. das Multiphysiktool CFD-ACE+ der Firma ESI Group etc.) verwendet. Als Resultat liefert das Modell die erwarteten Durchschlagspannungen in Abhängigkeit der Verzögerungszeit nach dem Stromnulldurchgang.

Charakteristischer Verlauf der dielektrischen Wiederverfestigung

Im Rahmen der Arbeit wird die dielektrische Wiederverfestigung für diverse Strömungsbedingungen untersucht. Die Variation erstreckt sich hierbei von einer unbelassenen Anordnung (Strömung I), der Ausnutzung des Selbstblasprinzips (Strömung II) bis hin zu extern erzeugten Bestömungen mit Kaltgas (Strömung III und IV). Die Kaltgasströmung im Fall der Strömung III entspricht einem Volumenstrom von 200 l/min und Strömung IV entspricht einem Volumenstrom von 400 l/min. In Abbildung 2 werden aus Gründen einer besseren Übersichtlichkeit lediglich

die Mittelwerte der gemessenen Durchschlagspannungen dargestellt.

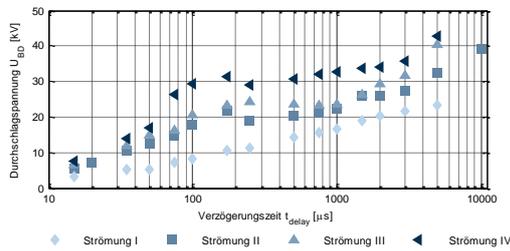


Abb 2: Charakteristischer Verlauf der dielektrischen Wiederverfestigung für verschiedene Strömungsbedingungen

Es lässt sich beobachten, dass der Verlauf der für die Strömung I ermittelten Durchschlagspannungen dem einer unbeblasenen zylinderförmigen Anordnung entspricht vgl. [1] und sich in zwei Phasen vollzieht. Dem gegenüber zeigen die beblasenen Anordnungen einen charakteristischen Verlauf, der sich in drei Phasen einteilen lässt. Auf einen schnellen Anstieg der gemessenen Durchschlagspannungen bis zu einer Verzögerungszeit von etwa 100 µs nach dem Stromnulldurchgang. Folgt in der zweiten Phase bis hin zu einer Verzögerungszeit von etwa 1000 µs eine Stagnation der gemessenen Durchschlagspannungen. Im Weiteren zeitlichen Verlauf schließt sich mit Phase drei eine Phase an, in der sich die Strecke zunehmend weiter verfestigt, dies verläuft aber im Vergleich zu Phase I mit einer reduzierten Steilheit.

Für die durchgeführten Bestimmungen der Durchschlagspannung wird auch die Position innerhalb der Isolierstoffdüsenanordnung bestimmt. Dazu wird der Stagnationspunkt des verwendeten Modellschalters über optische Zugänge, die in einem Winkel von 90 Grad zueinander angeordnet sind, mit einer High-Speed-Kamera beobachtet. Die Position des Durchschlagpfads kann somit mittels einer einfachen Angulation bestimmt werden. Abbildung 3 stellt beispielhaft die Position der Durchschlag-

pfade für die beschriebene Anordnung und die Strömungsvariante IV dar.

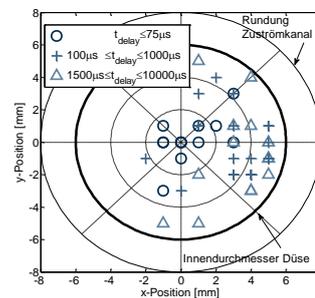


Abb 3: Bestimmung der Position der Durchschlagpfade im Stagnationspunkt

Es lässt sich für alle betrachteten Anordnungen ein ähnliches Verhalten beobachten. Innerhalb der Phase 1, d. h. für Verzögerungszeiten kleiner als 75 µs liegen die Durchschlagpfade fast ausschließlich im Zentrum der Isolierstoffdüsen. Im weiteren zeitlichen Verlauf verlagern sich diese Positionen innerhalb der Phase 2 weiter in Richtung der inneren Wand der Isolierstoffdüsen. In Phase 3 liegen die Durchschlagpfade in einem engen radialen Bereich vor der inneren Wand der Isolierstoffdüse. Diese Translation liegt zum einen in den Strömungsbedingungen begründet, wird aber auch durch das Verhalten der Isolierstoffdüsenwand selbst beeinflusst. Innerhalb von Phase 1 herrschen die höchsten Temperaturen innerhalb des Zentrums der Isolierstoffdüse, da sich der axial beblasene Lichtbogen kurz vor dem Stromnulldurchgang überwiegend im Zentrum des Gasraumes und somit der Isolierstoffdüse bewegt. Im zeitlichen Verlauf wird das Gas in Folge der Beblasung bzw. der sich einstellenden Kühlungsmechanismen stetig weiter abgekühlt. Die Temperatur der inneren Isolierstoffdüsenwand beträgt jedoch auf Grund der andauernden Pyrolyse auch einige Millisekunden nach dem Stromnulldurchgang noch mehr als 1000 K. Es bildet sich also eine Gasschicht erhöhter Temperatur unmittelbar vor der

inneren Wand der Isolierstoffdüse aus. Diese Gasschicht versucht auf Grund der Maximierung der Entropie die Temperatur auf etwa 3200 K einzustellen. Daher kehrt sich der Wärmefluss vom Gas zur Wand in Richtung des Düsenzentrums um. Abbildung 4 stellt exemplarisch den Verlauf der Temperatur der Isolierstoffdüsenwand dar.

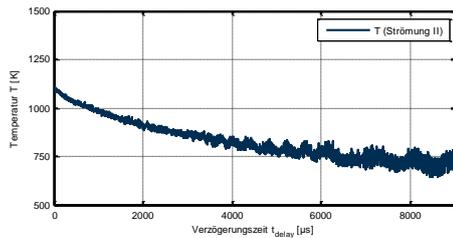


Abb 4: Temperatur an der inneren Isolierstoffdüsenwand

Die hier getroffenen Feststellungen fließen in die anschließende Modellierung mit ein.

Modellbildung

Auf Grund der in den vorausgehenden Abschnitten erläuterten Ergebnisse, werden die zur Modellierung der Durchschlagspannung relevanten Eingangsparameter (Temperatur, Gasdichte, Feldverlauf, etc.) mit Hilfe von kommerziellen Tools, wie beispielsweise dem Multiphysiktool CFD-ACE+, nicht im gesamten Volumen, sondern zum einen unmittelbar vor der inneren Düsenoberfläche und zum anderen im Zentrum der Isolierstoffdüse bestimmt. Mit Hilfe der auf diese Weise bestimmten Eingangsparameter können somit die zur Anwendung des Streamerkriteriums relevanten effektiven Ionisationskoeffizienten bestimmt werden. Als Resultat der Anwendung des Streamerkriteriums ergeben sich somit die Durchschlagspannungen für das Düsenzentrum und dem Bereich vor der inneren Wand der Isolierstoffdüse. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der berechneten und experimentell bestimmten Ergebnisse (Abb. 5). Des Weiteren lässt sich feststellen, dass für Verzögerungszei-

ten bis etwa 100 µs nach dem Stromnull-durchgang die Durchschläge im Zentrum der Isolierstoffdüse stattfinden. Im späteren zeitlichen Verlauf liegen sie im Bereich der Düsenoberfläche.

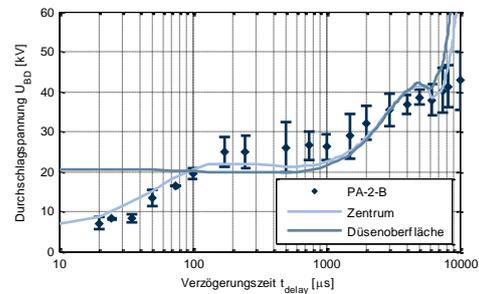


Abb 5: Vergleich zwischen Experiment und Berechnung

Fazit

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Modellvorstellungen können zur Abschätzung von Grenzfällen bzw. zur worst case Auslegung zukünftiger Selbstblasleistungsschalter herangezogen werden.

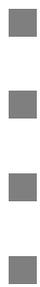
Quellen

- [1] Kurz, A./ Seeger, M./ Roggendorf, C./ Kahlen, J. C./ Schnettler, A.: "Determination of the dielectric recovery in an insulating nozzle", in: XVIIIth Symposium on Physics of Switching Arc, Nové Město na Moravě, Czech Republic, 2009, S. 238-241.
- [2] Christen, T.: "A maximum entropy production model for Teflon ablation by arc radiation", in: Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 40, 2007, S. 5719-5722.

Kontakt

Dr.-Ing. Andreas Kurz
 kurz@ifht.rwth-aachen.de
 +49 (241) 80-90 270







Lehre am IFHT

Entwicklung eines wissensbasierten Computerlernspiels für den Studiengang Elektrotechnik

Mit der Plattform Exploratory Teaching Space sollen an der RWTH innovative Projekte in der Lehre gefördert werden. Das IFHT und das Institut für Erziehungswissenschaft (EZW) beteiligten sich hierbei an der Ausschreibung mit dem gemeinsamen Antrag ein wissensbasiertes Computerlernspiel für den Studiengang Elektrotechnik zu entwickeln. Ein solches wissensbasiertes Lernspiel stellt eine didaktische Möglichkeit dar, den Lernenden in den Fokus des Lernprozesses zu stellen. Durch die Bewilligung der Projektmittel war es möglich im Rahmen des Exploratory Teaching Space dieses Spiel zu planen und umsetzen zu lassen.

Einleitung und Motivation

Die kontinuierliche Verbesserung von Forschung und Lehre ist ein strategisches Ziel moderner Universitäten. Aktuell laufen eine Vielzahl von Projekten zum Einsatz von e-learning-Ansätzen in der Lehre. In diesem Bereich bietet sich die Herangehensweise des Game-based learning an [1][7][8]. Die Besonderheit dieser Herangehensweise ist, dass der Lernende in den Fokus gestellt wird, da er zum einen durch die Interaktion mit dem Spiel handelnd tätig wird und zum anderen die Motivation, sich mit den Lerninhalten des Spiels auseinanderzusetzen, erhöht wird. Im Rahmen des hier beschriebenen Projektes ist ein Prototyp eines wissensbasierten Computerlernspiels (wCL) entwickelt und getestet worden.

Lerntheoretischer Hintergrund

Die Lehre in den Ingenieurwissenschaften allgemein und in der Elektrotechnik insbesondere steht vor der Herausforderung, technisch komplexe und oftmals für den Anfänger wenig anschauliche Inhalte vermitteln zu müssen. Da die Zielgruppe der Elektrotechniker das Medium Computerspiele zumeist häufig und gerne nutzt, kann

der Einsatz eines wCL besonders vielversprechend sein [1][2][6]. Beim Spielen eines beliebigen Computerspiels stellen sich automatisch Lernprozesse ein, die jedoch zunächst ungesteuert ablaufen [5]. Es soll versucht werden, Lerninhalte so in das Setting des Spiels einzubetten, dass gezielt Lernprozesse initiiert werden können. Das Computerspiel zeichnet sich dadurch aus, dass der Spieler mit dem Computerspiel interagiert. Somit werden Handlungen ausgeführt, die in einem Kontext stehen und die durch das Setting des Computerspiels legitimiert sind und Konsequenzen haben. Hier bietet sich die Möglichkeit, reale Handlungen in einer virtuellen Realität auszuführen und deren Folgen zu erleben [3]. Wenn es gelingt, ein wCL zu entwickeln, in dem Handlungen aufgrund fachlichen Wissens ausgeführt werden müssen, wird der Spieler in die – zwar virtuelle, aber gleichzeitig realitätsnahe – Situation gebracht, sich mit diesem fachlichen Wissen auseinander zu setzen bzw. das aus Lehrveranstaltungen vorhandene fachliche Wissen in einem neuen Kontext anzuwenden. Zudem steigt beim Spieler die Motivation genau dies zu tun [4].

Setting und didaktische Umsetzung

Für das Setting wurde ein verschollenes Raumschiff in der Zukunft gewählt, auf das der Spieler als Ingenieur geschickt wird, um dort ausgefallene Systeme zu reparieren und so das Schiff zu bergen. Das Setting wurde gewählt, weil ein solches Raumschiff viel Technik beinhalten kann, und die Möglichkeiten bietet, technische Inhalte zu präsentieren. Abbildung 1 zeigt die Ansicht eines Flures im Raumschiff. Der Spieler bewegt sich in der Egoperspektive durch die Flure des Raumschiffes.

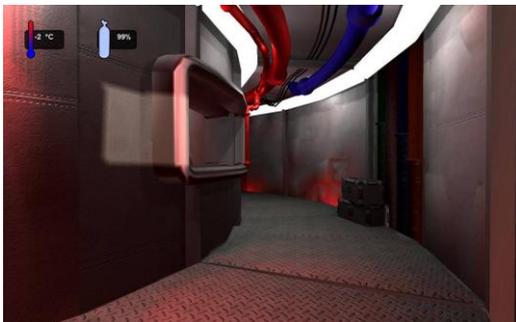


Abb. 1: Ansicht eines Flures im Raumschiff

Die elektrotechnischen Inhalte wurden aus dem Lehrplan des ersten Semesters des Bachelorstudienganges derart ausgewählt, dass sie exemplarisch die Bandbreite des Lernstoffes abdecken. Diese Inhalte wurden so aufgearbeitet, dass sie im Setting des Raumschiffes angewendet werden können. Dazu wurde ein besonderes Augenmerk darauf gelegt, dass die Inhalte in elektrotechnische Schaltungen umgesetzt wurden, die sowohl technisch als auch in der Umgebung eines Raumschiffes Sinn ergeben.

Wie im vorangegangenen Abschnitt bereits erwähnt, bietet das Computerspiel dem Spieler die Möglichkeit, mit einer virtuellen Realität zu interagieren. Um diese Interaktion mit für den Spieler motivierenden Resultaten auszugestalten, musste beachtet

werden, dass beispielsweise eine gelungene Reparatur die virtuelle Realität so beeinflusst, dass der Spieler motiviert ist, diese durchzuführen, um weiterspielen zu können. Gleichzeitig musste auch der Schwierigkeitsgrad der so zu lösenden Aufgaben sehr genau beachtet werden.

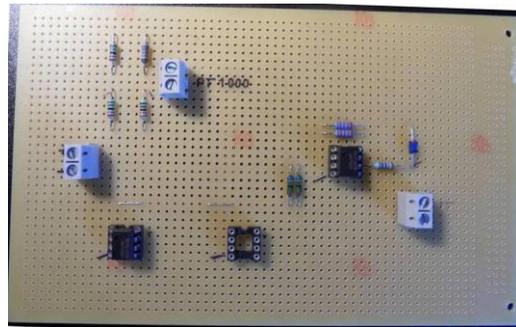


Abb. 2: Foto einer Platine mit elektro-Schaltung

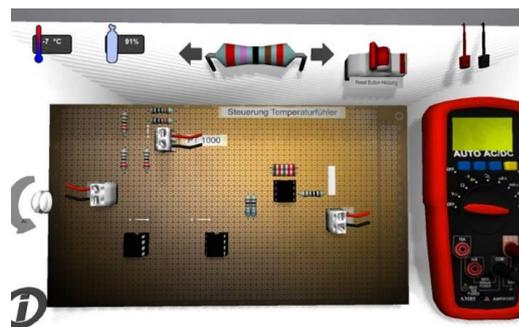


Abb. 3: Darstellung der Platine im Spiel

Die Aufgaben sollen

1. Im Schwierigkeitsgrad ansteigen
2. Komplex genug sein, um nicht durch Ausprobieren lösbar zu sein
3. Einfach genug sein, um den Spieler nicht zu überfordern und zu frustrieren.

Auf diese Weise wurden drei erste Aufgaben definiert.

- a) allgemeine Elektroinstallation
- b) eine Transistorschaltung und lineare Netzwerke

- c) die Wheatstonesche Messbrücke sowie Operationsverstärkerschaltungen.

Dies sind alles Lerninhalte des ersten Semesters [9]. Nach dem Design der Schaltungen wurden diese in der Elektronikwerkstatt des IFHT auf Platinen gelötet und auf Funktion überprüft. Anhand dieser realen Schaltungen konnte das optische Design des Spiels besonders realitätsnah gestaltet werden (vgl. Abb. 1 und Abb. 2). Mit diesen Informationen wurden extern ein Programmierer und ein Designer mit der Realisierung des Spieles beauftragt.

Evaluation

Die Evaluation wurde mit einer Stichprobe von 19 Probanden durchgeführt, wobei die Expertise des EZW (Institut für Erziehungswissenschaft) sehr wichtig war. Es kam die Methode des Stimulated Recall zur Anwendung. Dabei spielten die Probanden 30 Minuten lang das Spiel, und wurden dabei mit einer Screenshot Software aufgezeichnet. Anschließend wurde den Probanden dieses Video vorgespielt und sie wurden zu ihren Gedankengängen und Entscheidungen befragt. Zusätzlich wurde ein Fragebogen eingesetzt, in dem die Probanden zu ihrer Meinung über das Spiel befragt wurden. Fast alle Probanden (18 von 19) waren in der Lage die erste Aufgabe zu lösen. Es waren jedoch nur 2 von 19 Probanden in der Lage, die zweite Aufgabe zu lösen. Keinem der Spieler gelang die Lösung der dritten Aufgaben, (Zeitbegrenzung). In den Interviews zeigte sich, dass die meisten Probanden Probleme mit der Bedienung des Spiels hatten. Dies lag daran, dass die Bedienung der Egoperspektive, die bei Computerspielen bekannt ist, für die Bearbeitung der Aufgaben verlassen werden musste. In dieser Bearbeitungsansicht waren die Bedienelemente zunächst ungewohnt, was zu Zeitverlusten führte, weil zunächst ausprobiert werden musste.

Trotz dieses Problems vergaben die Spieler eine Durchschnittsnote von 2,5. Auf einer Skala von 1 (keinesfalls) bis 5 (auf jeden Fall) wurde gefragt, ob sie gerne weitergespielt hätten. Mit einem Votum von 4,1 fiel die Antwort eindeutig positiv aus. Auf einer Skala von 1 (keinesfalls) bis 5 (auf jeden Fall) bewerteten die Spieler, ob das Spiel ihrer Meinung nach beim Lernen hilfreich sein kann. Mit einem Durchschnittswert von 3,9 war das Votum ebenfalls ausnehmend positiv. Diese Ergebnisse zeigen, dass im entwickelten Prototyp des wCL noch Verbesserungspotential steckt, aber auch, dass der gewählte Ansatz vielversprechend ist. Insbesondere könnte die Entwicklung eines zusätzlichen Tutorial-Levels die aufgetretenen Probleme bei deren Bedienung beheben.

Zusammenfassung

Durch die Projektmittel, die von der ETS Initiative zur Verfügung gestellt wurden, konnte der Prototyp eines wissensbasierten Computerlernspiels für die Studieneingangsphase des Studienganges Elektrotechnik an der RWTH Aachen entwickelt werden. Eine erste Evaluation ergab fast durchweg positive Ergebnisse. Für einen Einsatz des Spiels im Studiengang Elektrotechnik sprechen verschiedene Gründe. Es ist geplant, ein zusätzliches Tutorial-Level zu entwickeln, in dem sich der Spieler mit der Bedienung der speziellen Merkmale des wCL vertraut machen kann. Zur wissenschaftlichen Begleitung eines Einsatzes des wCL auf breiter Basis ist ein weiterer gemeinsamer Projektantrag von IFHT und EZW bei der Initiative TeachING Learning eingereicht worden.

Quellen

- [1] F. Adler: Computerspiele als Lernmedium und ihr Einsatz in den Ingenieurwissenschaften: Erarbeitung eines Analyse- und Entwicklungsmodells. (Dissertation). 2009.
- [2] F. Adler & C. Dehne: Computernutzung von Studierenden der Elektrotechnik: Eine Befragungsstudie zur Erkundung der Akzeptanz von Computerspielen als Grundlage für ein Game-Based Learning-Konzept. (Arbeitsbericht Nr. 4). Augsburg: Universität Augsburg, Medienpädagogik. 2004.
- [3] S. Barab, M. Gresalfi, A. Ingram-Goble: Transformational Play: Using Games to Position Person, Content, and Context. In: Educational Researcher, pp. 525-536. 2010.
- [4] E. Deci & R. Ryan: Die Selbstbestimmungstheorie der Motivation und ihre Bedeutung für die Pädagogik. Zeitschrift für Pädagogik, 1993, 39, S. 223-238.
- [5] J. Gee: Learning by Design: Good video games as learning machines. E-Learning, Volume 2, Number 1. 2005.
- [6] M. Mayo: Games for science and engineering education. 2007.
- [7] D. Petko: Unterrichten mit Computerspielen. 2008.
- [8] M. Prensky: The Digital Game-based Learning Revolution. New York:McGraw-Hill. 2001.
- [9] Modulhandbuch für den Bachelorstudiengang Elektrotechnik, Infor-

mationstechnik und technische Informatik der RWTH Aachen. 2010.

Kontakt

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

Vorlesungen

Hochspannungstechnik Isoliersysteme (SS)

Dozent: Prof. Dr.-Ing. A. Schnettler
V2/Ü1: Masterstudiengang
ECTS Credits: 5
Sprache: Deutsch u. Englisch

Inhalt

- Elektrische Belastungen in Hochspannungsnetzen: äußere Überspannungen, innere Überspannungen, Wanderwellen, Überspannungsschutz
- Isoliersysteme
- Gase, Vakuum, Flüssigkeiten, Feststoffe
- Durchschlagvorgänge
- Grenzflächenphänomene
- Charakteristika und Kenngrößen
- Alterung, Fremdschichten - Konstruktionsgrundlagen technischer Isoliersysteme
- Hermetischer Abschluss
- Kraftschlüssige Verbindungen - Exemplarische Anwendungen
- Kondensator
- Durchführung
- Ausleitung

Hochspannungstechnik Prüfsysteme & Diagnostik (WS)

Dozent: Prof. Dr.-Ing. A. Schnettler
V2/Ü1: Masterstudiengang
ECTS Credits: 5
Sprache: Deutsch u. Englisch

Inhalt

- Erzeugung hoher Gleich, Wechsel- und Stoßspannungen
- Erzeugung hoher Prüfströme
- Synthetischer Prüfkreis

- Messung hoher Prüfspannungen und -ströme
- Diagnostik
- Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
- 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: Bachelorstudiengang
ECTS Credits: 4
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 Transformertorkaskaden zur Erzeugung von Prüfwechselspannung

Unternehmensführung für Ingenieure (SS)

Dozent: Dr.-Ing. J. Schneider
V2/Ü1: Bachelorstudiengang
ECTS Credits: 3
Sprache: Deutsch

Inhalt

- Unternehmensstruktur, interne Organisation: Matrix, Profit und Cost Center; Logistik, Managementebenen; Externe Organisation: Rechtsformen von 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

Schutzmaßnahmen und Schutz-einrichtungen in elektrischen Netzen und Anlagen (SS+WS)

Dozent: Dr.-Ing. B. Thies
V2/Ü1: Masterstudiengang
ECTS Credits: 5
Sprache: Deutsch u. 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
- Schutz-einrichtungen und deren Wirkungsweise; Schutzkriterien; Sicherungen; LS- und FISchutzschalter;
- Relais; Überspannungsableiter
- Schutzsysteme Transformatoren-, Motor-, Generatorschutz

Power Cable Engineering (WS)

Dozent: Dr.-Ing. D. Meurer
 V2/Ü1: Masterstudiengang
 ECTS Credits: 4
 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)

Freileitungen (WS)

Dozent: Dr.-Ing. R. Puffer
 V2/Ü1: Masterstudiengang
 ECTS Credits: 4
 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

Hoch- und Mittelspannungsschaltgeräte und -schaltanlagen

Dozent: Prof. Dr.-Ing. A. Schnettler,

Dr.-Ing. R. Puffer

V2/Ü1: Bachelorstudiengang

ECTS Credits: 4

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

Seminare

Schutz- und Leittechnik

TÜ3, Master-, Diplomstudiengang
ECTS Credits: 4
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.

Energieversorgung der Zukunft

TÜ3, Bachelor-, Master-, Diplomstudiengang
ECTS Credits: 4
Sprache: Deutsch und Englisch

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

TÜ3, Diplomstudiengang
ECTS Credits: 4
Sprache: Deutsch und Englisch

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.

Praktika

Elektrotechn. Praktikum I (SS)

TÜ3, Bachelorstudiengang
ECTS Credits: 3
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

Hochspannungstechnisches Praktikum

TÜ4, Masterstudiengang
ECTS Credits: 4
Sprache: Deutsch

Inhalt

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

Energietechn. Praktikum I (SS)

TÜ4, Masterstudiengang
ECTS Credits: 4
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

Energietechn. Praktikum II (WS)

TÜ4, Masterstudiengang
ECTS Credits: 4
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

Messtechnisches Labor für Maschinenbauer (SS)

TÜ4, Bachelor- u. Masterstudiengang und Lehramtsstudiengänge
ECTS Credits: 4
Sprache: Deutsch

Inhalt

Im Rahmen dieses Praktikums werden vom Institut vier Versuche angeboten:

- Spannungsquelle, Transformator
- Meßbereichserweiterung, Meßwandler, Leistungsmessung im Drehstromnetz
- Elektronenstrahloszilloskop, Gleichrichtung
- Digitale Meßtechnik

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 27. und 28. Juni 2011 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 hohen Nachfrage. Dieses Jahr nahmen rund 50 Personen aus der Industrie und den Versorgungsunternehmen, sowie rund 100 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.

Es folgt ein Überblick über das diesjährige Seminarprogramm:

- **Begrüßung und Einführung in die Thematik**
Prof. Dr.-Ing. Armin Schnettler,
RWTH Aachen, Institut für Hochspannungstechnik
- **Schaltlichtbögen und SF6-Hochspannungsleistungsschalter**
Dr.-Ing. Max Claessens,
ABB Schweiz AG, Zürich

- **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
- **Hochspannungsschaltanlagen - Freiluftschaltanlagen**
Dipl.-Ing. Gerd Lingner,
Siemens AG, Energy Sector, Power Transmission Division, Erlangen
- **Hochspannungsschaltanlagen – Gasisolierte Schaltanlagen**
Dipl.-Ing. Jörg Riedl,
Siemens AG, Energy Sector, Power Transmission Division, Erlangen
- **Ortsnetzstationen**
Dipl.-Ing. Gisbert Brüggemann,
Viva Electrica!, Wetter
- **Leistungstransformatoren**
Dipl.-Ing. Frank Hofmann,
ALSTOM Grid GmbH, Bereich Schorch Transformatoren, Mönchengladbach
- **Mittelspannungsschaltanlagen**
Dr.-Ing. Stefan Göttlich,
ABB AG Calor Emag Mittelspannungsprodukte, Ratingen
- **Kabel und Freileitungen**
Dr.-Ing. Frank Merschel,
RWE Deutschland 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 ALSTOM Grid GmbH in Mönchengladbach und zur 400kV Schaltanlage Aachener Kreuz angeboten. Wir möchten uns noch einmal ganz herzlich bei STAWAG Aachen und ALSTOM Grid Mönchengladbach für die hervorragende Betreuung während unseres Besuchs bedanken. Ein großer 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. Michael Peitz
peitz@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-49331

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

Seminar Schutz- und Leittechnik

Das an der RWTH Aachen angebotene Seminar "Schutz- und Leittechnik" fand auf Einladung der Firma OMICRON electronics GmbH in Vorarlberg, Österreich statt. Ziel des Seminars 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 zum zweiten und dritten Mal im Sommer- und Wintersemester dieses Jahres jeweils einem Dutzend interessierter Studierender der RWTH Aachen 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.

Den Studierenden begegnete mit Herrn Rainer Luxenburger von OMICRON electronics ein geübter und in der Materie sehr erfahrener Referent. In den jeweils 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 Seminar 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 die gelungenen Seminarveranstaltungen. 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 Führungen im Umspannwerk Bürs durch einen langjährig erfahrenen 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 Ko-



Abb. 1: Teilnehmer im Wintersemester 2011-2012

operation 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 Studierenden 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

In 2011 abgeschlossene Diplom-, Master-, Bachelor-, und Studienarbeiten

Diplomarbeiten

Bellut, Markus

Konzeption einer Prüfeinrichtung für Vakuumschaltkammern

Für Mittelspannungsanwendungen bis zu 40,5 kV hat sich die Vakuumschalttechnik über die letzten 30 Jahre hinweg im Markt 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 wird maßgeblich durch den eingesetzten Kontaktwerkstoff und dessen Abbrandverhalten bestimmt. Bislang sind die Betreiber bei der Wahl der Instandhaltungsstrategie auf Erfahrungen angewiesen, was zu einer verminderten Nutzungsdauer der Schaltkammern führt. Daher soll im Rahmen dieser Arbeit eine Prüfeinrichtung konzipiert werden, die vor Ort eine nicht-destruktive Zustandsbewertung der Kammer ermöglicht und somit ggf. deren Betriebsdauer und dadurch deren Ausnutzung erhöht.

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

Fei, Jia

Modellierung der globalen Märkte für fossiler Energieträger nach volkswirtschaftlichen Kriterien als Bestandteil der Kraftwerksausbauplanung

Das verstärkte Bewusstsein der Klimaveränderung hat in der öffentlichen Diskussion, wie auch in der Politik und der Wissenschaft zu einem verstärkten Interesse an der nachhaltigen Energieversorgung geführt. Dabei spielt Kraftwerksausbauplanung eine zentrale Rolle für zukünftige Energieversorgung.

Im Rahmen der Diplomarbeit soll ein Modell zur Abbildung der globalen Ressourcen-Märkte (in diesem Fall Erdgas, Erdöl und Kohle) entwickelt werden. Daher werden aufbauend aus Berechnung und Projektionen zum jeweiligen Bedarf an Energieträgern, weitere relevante Einflussfaktoren analysiert. Den Hauptteil der Arbeit bildet das Modell, in dem die kostenminimale Allokation der Energieträger vorgenommen wird unter Beachtung der definierten Nebenbedingungen, um mögliche Preis- und Abbaupfade zu bestimmen. Die resultierenden Preispfade dienen später als endogenen Input Variablen der Kraftwerksausbauplanung.

Zur Ermittlung der mögliche Preis- und Abbaupfad werden drei Szenarien anhand der verschiedenen Annahme bezüglich wirtschaftliche Entwicklung und Politik Maßnahmen definiert und analysiert.

Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass der Energiebedarf in der Regel stark von Energiepreis, Politikmaßnahmen und Energieeffizienz abhängig ist; während der Preispfad wird vor allem bei Produktionskosten, Kapital Marktzinssatz und der Wechselwirkung zwischen den Preis und die Nachfrage beeinflusst.

Betreuer: Dipl.-Wirt.-Ing. Baris Özalay

Frehn, Tobias

Untersuchungen zum Verhalten der örtlichen Widerstandsverteilung von Schaltlichtbögen zum Zeitpunkt des Stromnulldurchgangs

In Hochspannungs-Leistungsschaltern werden Lichtbögen innerhalb von Isolierstoffdüsen geführt und durch eine Bebläsung mit Gas gekühlt. Diese Bebläsung sorgt kurz vor dem natürlichen Stromnulldurchgang für einen Anstieg des Lichtbogenwiderstandes. Die Höhe des Widerstands ist entscheidend für eine erfolgreiche Schalthandlung des Leistungsschalters. Am Institut für Hochspannungstechnik ist ein neuartiges Verfahren zur Bestimmung der örtlichen Widerstandsverteilung entwickelt worden. Dieses wird im Rahmen der Diplomarbeit optimiert und in einen Modellschalter eingebaut. Hierbei sind zahlreiche Anforderungen an die mechanische und elektrische Auslegung zu erfüllen. Anschließend wird das neuartige Verfahren erstmalig angewendet um die orts aufgelösten Widerstandsverläufe von axial beblasenen Schaltlichtbögen unter verschiedenen Rahmenbedingungen aufzuzeichnen

Betreuer: Dipl.-Ing. Matthias Hoffacker

Gitis, Alexander

Technisch-ökonomische Bewertung zukünftiger Mittelspannungs-Verteilungsnetze mit DC-Technologie

In der Zukunft wird ein zunehmender Anteil der Verbraucher in elektrischen Verteilungsnetzen über leistungselektronische Umrichter eingebunden sein. Dies trifft insbesondere in Mittelspannungs-Industrienetzen zu, in denen Großantriebe verstärkt umrichter-gespeist angeschlossen werden. Ob sich die Gleichstrom-Technologie (DC, direct current) gegenüber der klassischen Wechselspannungstechnik in solchen Elektrizitätsnetzen als

vorteilhaft erweisen wird, konnte bisher nicht eindeutig gezeigt werden. Daher soll in dieser Arbeit eine Bewertung von Mittelspannungsnetzen mit DC-Technologie unter technischen und ökonomischen Kriterien vorgenommen werden, um die Vorzüge der Gleichstromtechnik zeigen zu können.

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

Goergens, Philipp

Analyse technischer Anforderungen an einen optimalen Betrieb virtueller Kraftwerke

In der vorliegenden Diplomarbeit werden unterschiedliche Ansätze zur Modellierung einer Vielzahl an dezentralen Wandlungseinheiten analysiert, um diese wirtschaftlich optimieren zu können. Im Verbund können diese herangezogen werden um an Strom-Märkten und Märkten für Systemdienstleistungen, insbesondere Regelenergiemärkten, bereitzustellen. Als eine Komponente dieser dezentralen Anlagen wird eine Vielzahl an Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK-Anlage) modelliert und somit als virtuelles Kraftwerk betrachtet. Zur Ermittlung der optimalen Anlagenfahrpläne und zur Maximierung des Deckungsbeitrages müssen also Koordinationsstrategien determiniert werden, die die Optimierung eines Large-Scale Optimierungsproblems in exakter Weise ermöglichen. Da jedoch die zur Verfügung stehenden geschlossenen Verfahren keine, oder nur unter sehr großem Zeitaufwand Lösungen liefern, werden Dekompositionsverfahren herangezogen. Diese führen eine Aufteilung des Optimierungsproblems durch, so dass kleinere Probleme sequentiell gerechnet werden können. Des Weiteren werden Aggregationstechniken analysiert, die eine Clusterung von Anlagen vollzie-

hen und somit die Größe des Problems reduzieren.

Von der durchgeführten Analyse kann als Handlungsmaßnahme abgeleitet werden, dass Aggregationsverfahren eingesetzt werden können, um eine gute Lösung in moderater Zeit zu erhalten. Je nach Grad der Clusterung entfernt sich die ermittelte Lösung stärker oder schwächer vom Optimum. Die zwei Dekompositionsverfahren unterscheiden sich in ihrer Eignung für das vorliegende Problem. Während die Dantzig-Wolfe (DW) Dekomposition einen hohen Zeitaufwand zur Lösungsfindung benötigt und dabei einige Modalitäten des Regelenergiemarktes nicht berücksichtigen kann, ist die Verwendung des Verfahrens trotzdem bei einer extrem großen Anzahl an Anlagen möglich, da dann die verletzten Modalitäten auf das Optimierungsproblem keine Auswirkungen haben. Hierzu sind allerdings noch einige Untersuchungen durchzuführen. Der zeitliche Aufwand zum Auffinden einer Lösung der Lagrangean Relaxation (LR) ist vergleichsweise gering. Die gefundene Lösung ist allerdings nicht optimal, sondern kann als untere Grenze des Optimierungsproblems aufgefasst werden. Eine Kombination aus Aggregation und Dekomposition scheint eine attraktive Möglichkeit zu sein, die Stärken beider Verfahren zu vereinigen, bedarf allerdings weiterer analytischer Untersuchungen.

Betreuer: Dipl.-Ing. Stefan Kregel

Koopmann, Simon

Ganzheitliche Bewertung der Integration von Speichersystemen in Verteilungsnetzen mit hoher Durchdringung erneuerbarer Energien

Im Fokus der vorliegenden Diplomarbeit steht die Beantwortung der Frage, welchen Beitrag vielfältig einsetzbare Speichersysteme auf Verteilungsebene zu einer

stabilen und effizienten zukünftigen Elektrizitätsversorgung leisten können. Zentrales Ziel ist daher die Entwicklung eines Modells zur ganzheitlichen Bewertung der Einsatzmöglichkeiten von Speichern unter Berücksichtigung einer geeigneten Speicherauslegung.

Zur adäquaten Abbildung der simultanen und gekoppelten Entscheidung über verschiedene Einsatzmöglichkeiten kommt der Ansatz der geschlossenen gemischt-ganzzahligen linearen Programmierung bei der Modellbildung zur Anwendung. Es wird ein Gesamtmodell mit zwei Teilmodellen erstellt. Diese dienen als Grundlage für die ganzheitliche Bewertung.

Einerseits erfolgt auf Basis des Optimierungsansatzes die Entwicklung eines betriebswirtschaftlichen Teilmodells zur Bestimmung der kapitalwertmaximalen Auslegung und des deckungsbeitragsmaximalen Einsatzes an verschiedenen Strommärkten für einen Speicher in einem Netzgebiet ohne Engpässe. Damit lässt sich die Speicherinvestitionsentscheidung für individuelle betriebswirtschaftliche Agenten ermitteln.

Andererseits wird in einem volkswirtschaftlichen Teilmodell das zuvor entwickelte betriebswirtschaftliche Verfahren dahingehend erweitert, dass die Positionierung, die Auslegung und der netzkompatible Einsatz von Speichern zur Engpassbehebung in einem Netzgebiet bestimmt werden können. Die Implementierung ermöglicht es, Speicher neben der Nutzung zur Engpassbehebung gleichzeitig möglichst gewinnbringend an den Strommärkten einzusetzen.

Als Ergebnis konnte ermittelt werden, dass sich die Investition in Speicher in Netzgebieten ohne Engpässe bei heutigen Speicherinvestitionskosten und Marktpreisprognosen für betriebswirtschaftliche Agenten lohnt. Entscheidend für einen

wirtschaftlichen Speicherbetrieb ist dabei die Bereitstellung von Sekundärregelleistung.

Die ganzheitliche Speicherbewertung unter Berücksichtigung ökonomischer, ökologischer und technischer Aspekte für ein Netzgebiet in Nordfriesland mit Engpässen aufgrund zu hoher Windeinspeisung hat hingegen ergeben, dass Speicher aufgrund der heutigen regulatorischen Rahmenbedingungen keine volkswirtschaftlich lohnende Alternative zum Einspeisemanagement darstellen. Durch eine Flexibilisierung der Marktmodalitäten an den Regelleistungsmärkten oder eine Zuschreibung von CO₂-Zertifikaten an Speicherbetreiber fällt die ganzheitliche Bewertung der Speicheralternative jedoch deutlich positiver aus.

Betreuer: Dipl.-Wirt.-Ing. Bartholomäus Wasowicz, Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Thomas Dederichs

Kronewald, Artur

Analyse technischer Restriktionen und Potentiale der Anbindung von Offshore-Windparks an das europäische Verbundnetz

Die in der Nordsee geplanten offshore-Windparks mit Anschlussleistungen im Gigawattbereich führen zu absehbaren Veränderungen der elektrischen Energieerzeugung mit Folgen für die Stabilität des europäischen Verbundnetzes. Neben der internen Beschaffenheit der Offshore-Windparks hat die verbindende Übertragungstechnologie einen weiteren Einfluss auf die Qualität der einspeisenden Energie und ermöglicht zusätzlich das Angebot netzstabilisierender Systemdienstleistungen. Hierbei stellt die Spannungsstabilität an den Kopplungsstellen zum Übertragungsnetz einen wesentlichen Aspekt dar.

Betreuer: Dipl.-Wirt.-Ing. Andreas Roehder

Langstädtler, Julian

Untersuchungen zur Abbildung des Windpark-Verhaltens im Fehlerfall unter Nutzung von skalierten WEA-Modellen

Die vorliegende Arbeit widmet sich den Skalierungsmöglichkeiten von Windparks und ihrer Abbildung im dynamischen Fehlerfall auf Grundlage der Nutzung herstellereinspezifischer Einheitenmodelle. Es werden hierzu die Güte der Aggregationsansätze analysiert, bei denen ausgedehnte Windparknetze durch äquivalente Punktmodelle ersetzt werden. Den Untersuchungen liegen die Abbildung realer Windparks sowie die Anwendung der aktuell im Rahmen der Anlagenzertifizierung in Deutschland abgestimmten Verfahren zur Bewertung des dynamischen Fehlerfallverhaltens zu Grunde.

Zunächst werden dazu die bestehenden Netzanschlussrichtlinien sowie Modellierungs- und Validierungsstandards für Windenergieanlagen (WEA) in Deutschland erläutert und in einen internationalen Kontext gesetzt. Die national gestellten Anforderungen an WEA im Fehlerfall bilden die Grundlage der anzustellenden Untersuchung und stecken die Rahmenbedingungen für eine dynamische EZA-Simulation ab. Darauf aufbauend werden die eingesetzten WEA-Modelle beschrieben und typische Windparkkonfigurationen in Deutschland analysiert. Ihre Klassifizierung bildet das Fundament der daran anschließenden Sensitivitätsanalyse durch Parametervariation, bei der dominante Parameter von Windparks identifiziert und ihr Einfluss auf elektrische Kenngrößen der Erzeugungsanlage quantifiziert werden. Der Fokus liegt dabei auf einer zulässigen

Vernachlässigung von Betriebsmitteln bei einer Aggregation des Windparks.

Die Simulation und Parametervariationen der detaillierten Windparks münden in einen Vergleich mit skalierten WEA-Modellen, bei dem die detaillierte EZA als Benchmark herangezogen wird. Auf diese Weise können die Abweichungen der relevanten elektrischen Kenngrößen im Fehlerfall zwischen beiden Modellansätzen quantifiziert und anschließend bewertet werden. Eine Besonderheit dieser Arbeit stellt dabei die Beachtung unterschiedlicher Betriebspunkte des Windparks dar, welche einen erheblichen Einfluss auf die Ausgangsgrößen im dynamischen Fehlerfall besitzen. Weiterhin werden im Rahmen der Analyse kritische Betriebssituationen und ihre Auswirkungen auf eine Aggregation geprüft.

Aus den gewonnenen Resultaten werden Konsequenzen für die Anlagenberechnung und die dynamische Stabilitätsuntersuchung aufgezeigt sowie Empfehlungen für die Praxis ausgesprochen. Die Arbeit endet mit einem Ausblick auf weiterführende Fragestellungen und Analysemöglichkeiten.

Betreuer: Dipl.-Ing. Hendrik Natemeyer

Meyer, Andreas

Untersuchung der Einflussparameter in einem Verfahren zur Zustandsbewertung von Vakuumschaltkammern

Im Bereich der Mittelspannungsanwendungen bis zu 52 kV hat sich die Vakuumschalttechnik im Verlauf der vergangenen 30 Jahre gegenüber anderen Schaltprinzipien im Markt für Schaltgeräte etabliert. Dank der stetigen Weiterentwicklung, wie zum Beispiel die Optimierung der Kontaktformen und die Verwendung moderner Kontaktwerkstoffe können Vakuumschalt-

kammern mittlerweile in nahezu allen Anwendungsgebieten der Mittelspannung eingesetzt werden. Durch eine Verbesserung des Produktionsprozesses ist es darüber hinaus gelungen, die Lebensdauer der Vakuumschaltkammern von anfangs 20 auf gegenwärtig über 30 Jahre zu steigern.

Da die Betreiber bislang bei der Zustandsbewertung der Schaltkammer im Hinblick auf die Instandhaltungsstrategie auf Erfahrungen angewiesen waren, führte dies zu einer verminderten Nutzungsdauer der Schaltkammern. Im Gegensatz dazu erlaubt ein neu entwickeltes Prüfverfahren eine nicht-destruktive Analyse der Kammer, wodurch es dazu beitragen kann, die Nutzungsdauer der einzelnen Kammern zu erhöhen. In dieser Arbeit soll das Verfahren hinsichtlich der Sensitivität gegenüber verschiedenen Randbedingungen untersucht werden.

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

Parkitny, Alexander

Modellierung des Störungsverhaltens von Betriebsmitteln in luftisolierten Höchstspannungsschaltanlagen bei Umstellung der Instandhaltungszyklen

Zur Entwicklung und Anwendung von feldspezifischen Instandhaltungsstrategien in Hoch- und Höchstspannungsschaltanlagen, ist es erforderlich das Störungsverhalten aller Betriebsmittel in einem Schaltfeld abbilden zu können.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Grundlagenmodell zur Analyse und Modellierung des feldspezifischen Störungsverhaltens entwickelt. Basierend auf Datenbankinformationen werden dazu relevante Betriebsmittel in Hoch- und Höchstspannungsschaltanlagen analysiert und in Form von betriebsmittelspezifischen Alterungsmodellen abgebildet.

Um neben exemplarischen Schaltfeld-Analysen auch reale Schaltfelder im Übertragungsnetz untersuchen zu können, wurden neue Ansätze und Verfahren entwickelt die eine Integration und Auswertung aller in der Datenbank enthaltenen 123kV, 245kV und 420kV Betriebsmittel ermöglichen. Neben betriebsmittelspezifischen sind zudem beliebige hersteller- und technologieübergreifende Betriebsmittelanalysen möglich. Weiterhin wird mit s.g. Borrowing ein Modellierungsansatz entwickelt der bei Datenmangel zusätzliche Informationen zur Modellierung des Störungsverhaltens heranziehen und auswerten kann. Wenn die Alterungsmodelle aller relevanten Betriebsmittel in einem Schaltfeld bekannt sind, können dadurch Störungsprognosen für ganze Schaltfelder oder auch Anlagen erstellt werden.

Betreuer: Dipl.-Ing. Christian Hille

Peitz, Michael

Funktionale Anforderungen an autarke intelligente Ortsnetzstationen als Kernelemente zukünftiger Verteilungsnetze

Resultierend aus politischen und gesellschaftliche Zielen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen und der Erhöhung der Anteile regenerativer Energieerzeugungsanlagen, ist zukünftig mit einem vermehrten Einsatz von dezentralen Energiewandlungstechnologien und Elektrofahrzeugen in den Privathaushalten zu rechnen. Durch den unkoordinierten Anschluss dieser Technologien an die Niederspannungsnetze entstehen neue Herausforderungen innerhalb der Verteilungsnetze.

Innerhalb der Diplomarbeit sollen daher die Einflussmöglichkeiten autarker intelligenter Ortsnetzstationen auf den Betrieb der Verteilungsnetze sowie die dazu benötigten Anforderungen an die Ortsnetzstationen ermittelt werden. Das Hauptaugenmerk

wird da-bei auf die Regulierung langfristiger Spannungsbeeinflussungen mittels autark arbeitender Stufensteller in den Ortsnetzstationen gelegt.

Es werden zwei Modelle entwickelt, welche die Einflüsse von Elektrofahrzeugen sowie verschiedenen dezentralen Energiewandlungsanlagen auf die Stromnetze abbilden können. Dabei wird ein Modell zur Auswertung der Spannungsregelung innerhalb der deutschen Niederspannungsnetze entwickelt und die Anforderungen an die Stufensteller, in Abhängigkeit unterschiedlicher verbrauchernaheer Technologietypen, ermittelt. Zusätzliche Anforderungen für den Betrieb intelligenter autarke Ortsnetzstationen so-wie die Bewertung der Einflussmöglichkeiten in verschiedenen Zukunftsszenarien werden an Hand eines zweiten Modells dreier regionaler realer Mittelspannungsnetztypen mit unterlagerten Niederspannungsnetzen ermöglicht. Dabei wird auch eine Auswertung der Belastungsentwicklung ölgefüllter Verteilungstransformatoren in zukünftigen Verteilungsnetzen realisiert.

Die Auswertung der deutschen Niederspannungsnetze auf ihre Regelbarkeit durch autarke Stufensteller innerhalb intelligenter Ortsnetzstationen zeigt, dass die Stufenstellerregelung in einem erheblichen Maße zur Verbesserung der Spannungsqualität beitragen kann. Es existieren intelligente Ortsnetzstationen, welche eine Einbindung in zukünftige Netzbetriebskonzepte, wie beispielsweise Smart Grids, benötigen werden.

In Abhängigkeit der in der Niederspannungsebene angeschlossenen Technologien konnte festgestellt werden, dass zur Regelung der aufgetretenen Abweichung intelligente Ortsnetzstationen unterschiedliche Anforderungen erfüllen müssen.

Betreuer: Dipl.-Ing. Claas Matrose, Dipl.-Ing. Ansgar Hinz (Messko GmbH)

Petino, Cora Sophie

Modellierung und Untersuchung eines Multilevel-Voltage Source Converters mit kaskadierten Modulen ohne externe Spannungsversorgung

Die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungstechnik (HGÜ- Technik) bietet im Hinblick auf die selbstgeführte Umrichtertechnik (VSC Systeme) ein deutliches Potential für die geforderte Flexibilisierung zukünftiger Energieversorgungssysteme. Daher soll der Einsatz des „Modularen Mehrpunktumrichters“ (M2LC), der im Vergleich zu anderen Mehrpunktumrichtertypen aufgrund seines verteilten Energiespeichers für den Einsatz in der Hochspannungstechnik besonders geeignet ist, untersucht werden. Bei der Modellierung einer HGÜ Verbindung basierend auf dem M2LC und der Analyse auf Systemebene werden zwei verschiedene Ansätze verfolgt. Der erste Ansatz beinhaltet eine analytische Beschreibung des Systems im Frequenzbereich, durch den das System als linear und zeitinvariant betrachtet werden kann. Anschließend wird darauf aufbauend ein PQ-Betriebsdiagramm für ein Referenzsystem unter verschiedenen Bedingungen.

Der zweite Ansatz dieser Arbeit widmet sich der Entwicklung eines generischen Simulationsmodells mithilfe von MATLAB, Simulink und PLECS. Dieses Modell zeichnet sich neben der mathematischen Beschreibung des Umrichters, durch die flexible Skalierung der Modulanzahl aus. Es erlaubt auf Grund seiner Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit die Implementierung von zusätzlichen Regelungsstrategien für das betrachtete HGÜ-System basierend auf Modularen Mehrpunktumrichtern.

Betreuer: Dipl.-Ing. Daniel Eichhoff, Dr.-Ing. Andreas Kurz, Dr. Pierluigi Tenca

Potratz, Fabian

Ganzheitliche Analyse des Einflusses regulatorischer Maßnahmen auf dezentrale Energieversorgungssysteme

In der vorliegenden Arbeit werden die Auswirkungen von regulatorischen Maßnahmen auf dezentrale Energieversorgungssysteme ganzheitlich untersucht. Die Auswirkungen werden sowohl auf mikroökonomischer Ebene, als auch auf makroökonomischer Ebene der Volkswirtschaft, ökonomisch, ökologisch und technisch bewertet. Innerhalb der mikroökonomischen Ebene werden die Investitionsentscheidungen der Privathaushalte in Deutschland mit Hilfe eines agentenbasierten Modells unter Einfluss verschiedenster Fördermaßnahmen abgebildet. Hierbei wird besonderen Wert auf die Modellierung der Technologiediffusion von dezentralen Energiewandlungseinheiten gelegt. Der Diffusionsprozess wird unter Einsatz einer Vielzahl lernfähiger Agenten abgebildet und liefert der makroökonomischen Ebene Durchdringungsraten verschiedener Technologien.

Auf Grundlage probabilistischer Lastprofile, kombiniert mit Erzeugungsganglinien der dezentralen Energiewandlungseinheiten, sowie der industriellen Last, ergibt sich eine deutschlandweite Netzlast. Die Betrachtung auf makroökonomischer Ebene untersucht die Auswirkungen einer steigenden Diffusion dezentraler Energiewandlungseinheiten auf den deutschen Kraftwerkspark. Mit Hilfe einer Kraftwerkseinsatzplanung können Großhandelspreise endogen bestimmt und zur Steuerung einer Demand-Side-Integration genutzt werden. Des Weiteren wird auf Grundlage synthetischer Versorgungsgebiete eine Abschätzung der deutschlandweiten Netzausbaukosten unter Verwendung einer probabilistischen Lastflussrechnung vorgenommen.

Abschließend werden verschiedenen Szenarien simuliert und ihre Auswirkungen analysiert, wobei die regulatorischen Maßnahmen innerhalb der Szenarien variiert werden. Gleichzeitig werden unterschiedliche Annahmen über die Entwicklung exogener volkswirtschaftlicher Größen getroffen. Es wurde eine hohe Abhängigkeit der zukünftigen Durchdringungsraten im Bezug auf die Entwicklung der Haushaltstarife festgestellt. Der Zusammenhang entsteht durch die hohe Bedeutung des Eigenverbrauchs von regenerativ gewandelter Energie für die Rentabilität der Investitionen. Außerdem konnte eine Steigerung der Nutzung von Mittellastkraftwerken in Kombination mit steigenden Großhandelsmarktpreisen beobachtet werden. Die Kosten für einen Netzausbau betragen dabei lediglich zwischen 10% und 25% der PV-Förderkosten und fallen vor allem in ländlichen und vorstädtischen Versorgungsgebieten im Süden Deutschlands an.

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

Raab, Daniel Johann

Entwicklung von ökologischen Betriebsstrategien für Elektrofahrzeuge unter Berücksichtigung des Kraftwerksparks und erneuerbarer Energien

Im „nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität“ aus dem Jahr 2009 hat die deutsche Bundesregierung, als ersten Schritt zu einer emissionsneutralen Fortbewegung, das Ziel angekündigt, Deutschland als Leitmarkt für Elektromobilität zu etablieren. Den Vorzügen eines Umstiegs auf Elektrofahrzeuge, etwa der geräuscharmen und lokal emissionsfreien Fortbewegung oder der Verringerung der Abhängigkeit von Mineralölimporten, stehen dabei neben Reichweiteneinschränkungen und hohen

Anschaffungskosten für Elektrofahrzeuge auch ökologische Aspekte gegenüber. So führt die stärkere Auslastung des deutschen Kraftwerksparks aufgrund der steigenden Stromnachfrage zu erhöhten Emissionsbelastungen, die bei einer ganzheitlichen Betrachtung des Konzepts „Elektromobilität“ nicht außer Acht gelassen werden dürfen. Des Weiteren spielen auch die Integration erneuerbare Energien und netztechnische Aspekte bei der nachhaltigen Betrachtung des Umstiegs von fossilen Treibstoffen auf Strom eine tragende Rolle. Der Einsatz intelligenter Ladestrategien für Elektrofahrzeuge kann dabei einen wesentlichen Einfluss auf die Integrationsfähigkeit fluktuierender Erzeugung aus erneuerbaren Energien und die Vermeidung zusätzlicher Lastspitzen nehmen.

In dieser Arbeit werden daher ökologisch nachhaltige Betriebsstrategien für Elektrofahrzeuge unter Berücksichtigung des deutschen Kraftwerksparks entwickelt. Zu diesem Zweck steht die Darstellung der Rückwirkungen auf die Erzeugungsstruktur, die eine massive Integration von Elektromobilität in den deutschen Verkehrssektor nach sich zieht, im Mittelpunkt der Betrachtungen. Eine regionale Zuordnung von Fahrzeugen und Lasten ermöglicht die Generierung räumlich aufgelöster Steuerungssignale. Besondere Aufmerksamkeit gilt ferner dem Beitrag, den Elektrofahrzeuge zur Integration von erneuerbaren Energien liefern können. Zudem erfolgt die Berücksichtigung verschiedener Entwicklungspfade anhand einer ausführlichen Szenarioanalyse. Die Arbeit wird durch eine Auswertung der möglichen Folgen eines großflächigen Ausbaus des Elektromobilitätssektors auf das deutsche Übertragungsnetz abgerundet.

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

Raths, Stephan

Entwicklung optimaler agentenbasierter Betriebsstrategien für elektrische Wärmeerzeuger zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen am Regelenergiemarkt

In der vorliegenden Diplomarbeit wird ein Modell zur wirtschaftlichen Optimierung des Einsatzes elektrischer Wärmeerzeuger zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen an Regelenergiemärkten entwickelt. Der Fokus liegt dabei auf der Modellierung von Elektrospeicherheizungen und Wärmepumpen. Zudem werden Klein-KWK-Anlagen vereinfacht abgebildet. Dabei gehört zu einer optimalen Angebotsstrategie neben der Ermittlung des optimalen Anlagenfahrplans auch die simultane Wahl des optimalen Portfolios der Regelenergieprodukte, da sich Produkt- und Fahrplanwahl gegenseitig bezüglich der erzielbaren Deckungsbeiträge beeinflussen. Weil einige Eingangsgrößen Preis- und Mengensicherheiten unterliegen, die im Entscheidungsprozess zu berücksichtigen sind, wird die verwendete Methodik der gemischt ganzzahligen Optimierung um stochastische Komponenten erweitert, in denen die Unsicherheiten mit Szenarioreihen modelliert werden. Die Auswahl der Anlagenfahrweise und des Produktportfolios erfolgt im Modell entsprechend der Risikopräferenzen des Anwenders, die mittels probabilistischer Nebenbedingungen (engl.: Chance Constraints) modelliert werden.

Es zeigt sich im Rahmen der Untersuchungen, dass für verschiedene Anlagentypen unterschiedliche Angebotsstrategien optimal sind. Dabei hängt die Wahl der Strategie auch von jahreszeitlichen Effekten ab, da im Sommer keine Heizlast zu decken ist und für aufgenommene Regelenergie daher keine Verwendung besteht. Während Elektrospeicherheizungen in der Heizperiode eher zur Bereitstellung negativer Regelenergie zu negativen Arbeitspreisen in

den frühen Morgenstunden tendieren, bieten KWK-Anlagen bevorzugt positive Regelenergie mit positiven Arbeitspreisen zu Spitzenlastzeiten an. Durch eine Poolung verschiedener Anlagentechnologien kann es trotz dieser unterschiedlichen Präferenzen zu gegenseitiger Kooperation der verschiedenen Anlagentypen kommen, wenn so der Gesamterlös z.B. durch gemeinsames Erreichen von Mindestlosgrößen am Regelenergiemarkt gesteigert werden kann. Es zeigt sich zudem, dass je flexibler die Beschaffung der für Heizzwecke benötigten Wärmeenergie vorgenommen wird, desto mehr Erlöse auf den Märkten für Regelenergie erzielbar sind. Neben der Darstellung verschiedener Betriebsstrategien wird der Einfluss verschiedener Anlagen- und Rahmenparameter auf die erzielbaren Deckungsbeiträge untersucht.

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

Scharpenberg, Christoph

Definition von Prüfverfahren für das Verhalten von Elektrofahrzeugen und Ladesäulen im normalen wie fehlerhaften Netzbetrieb

In naher Zukunft ist ein hohes Aufkommen an Elektromobilität zu erwarten. Dieses wird Einfluss auf die elektrischen Übertragungs- und Verteilungsnetze haben.

Um den hohen Standard der Versorgungssicherheit der elektrischen Energie in Deutschland zu erhalten, sind in vorangegangenen Untersuchungen Verfahren zur Netzstützung durch Elektrofahrzeuge entwickelt worden. Diese Arbeit entwickelt die Grundzüge eines Verfahrens zur Prüfung realer Elektrofahrzeuge, die sich an systemstützenden Maßnahmen beteiligen. Das erarbeitete Prüfverfahren wird im entstehenden Prüflabor praktisch umgesetzt. Im Prüflabor entsteht die Nachbildung

eines Verteilungsnetzes in dem zukünftige Netzstrukturen mit dezentralen Erzeugern sowohl im normalen Netzbetrieb, als auch im Fehlerfall untersucht werden können. Die Möglichkeit zur schnellen Reaktion durch die Elektronik der Ladegeräte bietet sich an, um bei Fehlerfällen in elektrischen Netzen unmittelbar einzugreifen. Die Prüfung des Elektromobils bezieht sich auf einen frequenzabhängigen Leistungsbezug während des Ladevorgangs. Durch einen Niederspannungsnetzsimulator können beliebige Verläufe der Spannung oder Frequenz vorgegeben werden, um das Verhalten der Elektroautos zu überprüfen. Die Auswahl geeigneter Messtechnik war wesentlicher Bestandteil bei der Entwicklung der Prüfverfahren.

Es wurde daher Erfahrung im Umgang mit den Gerätschaften und den Anforderungen an diese gewonnen. Da zur Zeit der Arbeit noch keine Elektroautos mit einem frequenzabhängigen Leistungsbezug zur Verfügung standen, konnten bisher nur Prüfungen an unregulierten Elektroautos durchgeführt werden.

Betreuer: Dipl.-Ing. Claas Matrose, Dipl.-Ing. Tilman Wippenbeck

Schlösser, Tim

Analyse von Sensitivitätsparametern der Leistungsfähigkeit eines Verbundnetzes zur Herleitung eines Qualitätsindex

Zielsetzung der Arbeit ist die Untersuchung von Sensitivitätsparametern der Leistungsfähigkeit elektrischer Verbundnetze. Die Motivation liegt in der im Jahr 2009 eingeführten Anreizregulierung für elektrische Netze. Sie setzt durch Vorgabe einer Erlösobergrenze einen Anreiz bei Netzbetreibern, Kosten zu senken. Zeitnah kann diese Senkung durch unterlassene Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen erreicht werden. Daher ist in der Anreizre-

gulierungsverordnung eine zusätzliche Qualitätsregulierung, die das Ziel einer gleichbleibenden oder sogar verbesserten Qualität der Kostenreduktion gegenüber stellt, berücksichtigt. In Mittel- und Niederspannungsnetzen wird das Qualitätskriterium 2012 mit Hinblick auf die Kenngröße Netzzuverlässigkeit eingeführt.

In Verbundnetzen findet sich aufgrund der hohen Anforderungen an die Zuverlässigkeit ein stark vermaschter Aufbau vor. Störungen im Netz führen dadurch nicht zwangsläufig zu einer Versorgungsunterbrechung. Ausfälle durch unterlassene Instandhaltungsmaßnahmen können auch ohne Versorgungsunterbrechung zu Einschränkungen für Netzkunden führen und müssen deswegen berücksichtigt werden. Als Kriterium hierfür soll die Netzleistungsfähigkeit untersucht werden.

Die Prüfung der Verwendbarkeit der Kenngrößen und der Indizes erfolgt mit Hilfe von lastflussbasierten Ausfallsimulationen. Der erste Ansatz für Qualitätsregulierung von Transportnetzen zeigt die grundlegende Verwendbarkeit der Kenngrößen.

Betreuer: Dipl.-Ing. Michael Peitz, Dipl.-Ing. Christian Hille

Sellathurai, Thanaraj

Entwicklung einer agentenbasierten Netzbetriebsführung unter Berücksichtigung der Elektromobilität

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines georeferenzierten Verkehrsmodells. Dabei wurde der Unabhängigkeit bezüglich konkreter Verkehrsdaten besondere Beachtung gewidmet. Das Ziel war ebenfalls die Anwendbarkeit auf ein beliebiges Netzgebiet.

Das entwickelte Verkehrsmodell ermöglicht die Durchführung längerfristiger Simulationen, wie z.B. Wochensimulationen

oder auch Jahressimulationen. Durch die Georeferenzierung der Fahrzeugbewegungen sowie den ebenfalls georeferenzierten Netzknoten ist sowohl eine zeitliche als auch eine räumliche Betrachtung der durch Elektrofahrzeuge verursachten Belastung für das Netz möglich.

Exemplarisch wird das Verkehrsmodell auf ein reales Netzgebiet angewandt. Zur Abbildung des statistischen Verkehrsverhaltens ist aufgrund der Größe des Netzgebietes die Definition eines Betrachtungsgebietes erforderlich. Weiterhin wird anhand verschiedener Ladeszenarien und Einflussparametern wie Anschlussleistung und Ladekennlinie der Batterie, die Belastung auf das Netz bestimmt und die dadurch entstehende Überlastung der Betriebsmittel und die damit verbundenen Netzausbaukosten betrachtet.

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

Sowa, Torsten

Ermittlung optimaler Konfigurationen von Elektromobilen und dezentralen Wandlungseinheiten zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen

In der vorliegenden Diplomarbeit werden Verbände von Elektromobilen und anderen dezentralen Einheiten betrachtet, die an Strommärkten sowie Märkten für Systemdienstleistungen, insbesondere Regelenergiemärkten, teilnehmen können. Ziel ist es, deckungsbeitragmaximierende Betriebsstrategien für diese Teilnahme zu ermitteln.

Der Verbund als solcher nimmt als virtuelles Kraftwerk an diesen Märkten teil. Zur Ermittlung der optimalen Anlagenfahrpläne für diesen Verbund müssen Koordinationsstrategien entwickelt werden.

Zur Berechnung der optimalen Betriebsstrategie für die Teilnahme eines Verbundes am Markt kommt der Ansatz der geschlossenen gemischt-ganzzahligen linearen Optimierung bei der erforderlichen Modellbildung zur Anwendung.

Das Gesamtmodell eines Verbundes wird in zwei Teilen erstellt:

In dem ersten Teil wird jede einzelne Technologie für sich betrachtet und für die Elektromobile modelliert.

In dem zweiten Teil der Modellierung werden die Modelle verschiedener Technologien miteinander koordiniert. Durch die simultane Koordinierung einer Vielzahl dezentraler Anlagen entstehen große und komplexe Optimierungsprobleme, die mit den zur Verfügung stehenden geschlossenen Verfahren nicht oder nur sehr zeitaufwändig gelöst werden können. Durch die Implementierung von Dekompositionsverfahren wird hier das komplexe Optimierungsproblem in kleinere Teilprobleme zerlegt, die iterativ eine Lösung berechnen.

Als Ergebnis kann festgestellt werden, dass die Teilnahme an den Regelenergiemärkten in signifikantem Zusammenhang mit den erforderlichen Abschreibungskosten für die Batteriealterung stehen. Des Weiteren zeigt diese Arbeit, dass bei Flotten von Elektromobilen die Bereitstellung von negativer Sekundärregelleistung den höchsten Deckungsbeitrag erzielt.

Abschließend wird ein Verbund von Elektromobilen, KWK-Anlagen und Elektrospeicherheizungen untersucht. Hierbei zeigt sich, dass Elektromobile und Elektrospeicherheizungen sich bei der Bereitstellung von negativer Sekundärregelleistung unterstützen, während hingegen KWK-Anlagen bei der Bereitstellung von positiver Sekundärregelleistung unterstützt werden.

Betreuer: Thomas Pollok, M.Sc.

Stroband, Alexander

Szenarioanalyse zur Bewertung verteilter Energiewandlung mithilfe probabilistischer Last- und Erzeugungsprofile

Im Fokus der vorliegenden Diplomarbeit steht die Modellierung synthetischer Last- und Erzeugungsprofile für den Sektor der Privathaushalte, mit deren Hilfe die Auswirkungen einer vermehrten Integration dezentraler Erzeugungsanlagen untersucht werden sollen.

Dazu wird das Konzept eines bereits bestehenden Modells zur Erzeugung probabilistischer Haushaltslastprofile vollständig überarbeitet und das Modell nahezu komplett neu programmiert. Die synthetischen Profile ermöglichen detaillierte Zustandsbewertungen der Komponenten des Niederspannungsnetzes, welche im Hinblick auf eine steigende Anzahl ins Netz einspeisender dezentraler Erzeugungseinheiten als unabdingbar anzusehen sind. Ein Schwerpunkt bei der Modellbildung wird dabei auf eine einheitliche Implementierung gelegt, so dass jederzeit problemlos neue Daten in das Modell eingearbeitet werden können. Die Modellierung erfolgt größtenteils unter Anwendung der Wahrscheinlichkeitstheorie, wobei der Normalverteilung ein entscheidender Anteil zukommt.

Eine der wesentlichen Weiterentwicklungen besteht in der Möglichkeit verschiedene Haushaltsgrößen auszuwählen, wodurch vor allem die Realitätsnähe bei der Abbildung realer Siedlungen gesteigert werden kann. Im Bereich der dezentralen Erzeugungsanlagen können den Haushalten Photovoltaik- und Kleinwindenergieanlagen zugewiesen werden, da der Fokus zunächst auf nicht beeinflussbare Erzeuger im Niederspannungsnetz gelegt wird. Neben diesen elektrischen Last- und Erzeugungspro-

filen ist zudem eine Zuweisung von Wärmepumpen möglich. Zusätzlich zu weiteren Neuentwicklungen wie beispielsweise der Zuordnung der Lastspitzen zum jeweiligen Gerät oder der Nachbildung einer ganzen Siedlung verfügt das Tool über eine graphische Oberfläche, um die Anwendung der Software zu erleichtern.

Betreuer: Dipl.-Ing. Stefan Kregel, Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Markus Gödde

Surmann, Yvonne

Untersuchung und Bewertung des Einsatzes verschiedener Technologien zur Steigerung der Integrationsfähigkeit erneuerbarer Energien in elektrische Hochspannungsnetze

In der vorliegenden Diplomarbeit wurde ein genetischer Algorithmus zur optimalen Netzausbauplanung entwickelt. Die Netzerweiterungen sollen vor allem die Integration erneuerbarer Energien verbessern. Als Netzausbaumöglichkeiten werden neben dem Leitungsbau verschiedene FACTS-Devices (SVC, STATCOM, TCSC und PST) betrachtet. Im Rahmen der Arbeit wurde eine Modellierung dieser Technologien in MATPOWER umgesetzt. Der implementierte Algorithmus ist in der Lage den Einsatz all dieser Ausbauvarianten zeitgleich zu optimieren. Dabei kann entweder auf eine von fünf Zielfunktionen, welche eine ökonomische, ökologische oder technische Zielsetzung haben, zurückgegriffen werden oder es können, in Form einer multikriteriellen Optimierung, all diese Kriterien gleichzeitig betrachtet werden.

Da der Netzausbauplan vor allem die Integrationsfähigkeit erneuerbarer Energien fördern soll, erfolgt eine Bewertung der Ausbaumaßnahmen mithilfe eines Beispieljahres mit volatiler Windeinspeisung.

Als Grundlage der Berechnungen dient ein selbst erstelltes Testnetz.

Um die Anzahl möglicher Ausbaukandidaten zu begrenzen und damit die Möglichkeit zu haben den Algorithmus auf große Netze zu übertragen ohne das die Laufzeiten zu groß werden, wurden Heuristiken entwickelt, die aus der Gesamtzahl von Ausbaualternativen erfolgsversprechende Kandidaten auswählen.

Betreuer: Dipl.-Ing. Martin Scheufen

Tavassoli, Parsa

Analyse und Modellierung von Einflussfaktoren auf das Betriebsverhalten dezentraler Anlagen in zukünftigen Verteilungsnetzen

Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit der Analyse von Einflussfaktoren auf das Betriebsverhalten einer vermehrten Integration dezentraler Energiewandlungseinheiten in die elektrischen Verteilungsnetze.

Fokus der Arbeit liegt besonders auf der Vorstellung von Ansatzmöglichkeiten zur Planung, Auslegung und Integration von auf Basis der Kraft-Wärme-Kopplung arbeitenden Mikro-Blockheizkraftwerken (Mikro-BHKW) in das elektrische Versorgungsnetz. Für die Modellierung und Bewertung dieser Anlagen ist neben den elektrischen Lastprofilen die Kenntnis über den thermischen Leistungsverlauf von Versorgungsobjekten notwendig.

Hierfür werden zunächst in Anlehnung an die VDI-Richtlinien die probabilistischen thermischen Lastprofile der deutschen Wohngebäude in Analogie zu bereits erstellten elektrischen Lastprofile generiert.

Zur Untersuchung des Einflusses der BHKW-Anlagen auf die Niederspannungsnetze, wird zunächst ein Modell entwickelt, das das stochastische Verhalten der Tech-

nologien im wärmegeführten und netzorientierten Betrieb, simuliert. Dabei versucht die netzorientierte Betriebsweise die verschiedenen Anforderungen von Haus und elektrischem Netz mit einer möglichst großen gemeinsamen Schnittmenge zu erfüllen und die dezentrale Energiebereitstellung besser an die aktuelle Lastsituation im elektrischen Versorgungsnetz anzupassen.

Darauffolgend werden mit Hilfe dieses Simulationstools die Potentiale für die betrachteten Technologien anhand der Lastflussberechnung ermittelt.

Eine abschließende wirtschaftliche Bewertung stellt die konventionelle Energieversorgung mit der dezentralen und gekoppelten Energieversorgung mittels Mikro-BHKW-Systems gegenüber.

Betreuer: Dipl.-Ing. Stefan Kregel

Tempels, Robert

Regionalisierung des deutschen Strommixes anhand einer Ökobilanzierung des deutschen Kraftwerksparks und des Übertragungsnetzes

Im Fokus dieser Diplomarbeit steht die zeitliche und örtliche Auflösung der durch den deutschen Kraftwerkspark verursachten Emissionen. Zu diesem Zweck wird das Verfahren der Ökobilanzierung auf den Kraftwerkspark angewendet, um eine ganzheitliche Analyse aller Erzeugungstechnologien zu ermöglichen. Neben den Emissionen des konventionellen Kraftwerksparks werden die ökologischen Folgen des zunehmenden Anteils erneuerbarer Energien an der Stromversorgung untersucht.

Vor diesem Hintergrund ist die deutsche, elektrische Energieversorgung in einer vollständig georeferenzierten Form abzubilden. Darauf aufbauend wird ein Verfahren entwickelt, in dem unter Berücksichti-

gung kraftwerks- und netztechnischer Restriktionen sowie ökologischer Randbedingungen, stündlich aufgelöste Kraftwerksfahrpläne und Emissionsprofile generiert werden. Durch diese Vorgehensweise wird sowohl eine Analyse zeitlicher Interdependenzen zwischen Kraftwerkseinsatz und Emissionshöhe ermöglicht als auch eine Lokalisierung der Emittenten. Die Integration eines Netzmodells ist in diesem Kontext unabdingbar, da die Nutzung des Übertragungsnetzes hinsichtlich ökologischer Kriterien zu bewerten ist. Abschließend wird das Potenzial einer dezentralen Laststeuerung im Rahmen eines Demand Side Managements auf Übertragungsebene bewertet.

Als Ergebnis dieser Arbeit konnten in Höhe und Verlauf differierende Emissionsprofile für die vier Regelzonen erarbeitet werden. Es zeigte sich, dass die Amprion- und die 50Hertz-Regelzone sowie die TenneT- und die EnBW-Regelzone paarweise über vergleichbar strukturierte Erzeugungspotfolios verfügen, wodurch ähnliche Emissionsbelastungen im Tagesverlauf hervorgehen. Des Weiteren resultieren aus der veränderten Erzeugungsstruktur in den Jahren 2020 und 2030, in Form der lastfern positionierten Offshore-Windparkprojekte, gestiegene Anforderungen an das Übertragungsnetz, welche sich in erhöhten Leitungsauslastungen und Netzverlusten widerspiegeln. Ferner wurde gezeigt, dass ein gezieltes Demand Side Management einen positiven Effekt auf die Integration volatil einspeisender erneuerbarer Energien besitzt.

Betreuer: Dipl.-Wirt.-Ing. Eva Szczechowicz, Dipl.-Ing. Martin Scheufen

Wenk, Karina

Asset-Simulation zur Beurteilung des Einflusses des Q-Elementes im Rahmen der Anreizregulierung

Zielsetzung der Arbeit ist die Untersuchung des Zusammenhangs von Instandhaltung und Anreizregulierung. Motiv dieser Untersuchung ist der zusätzliche Kostendruck, der den Netzbetreibern in Folge des Übergangs von einer Preis- zu einer Anreizregulierung entsteht. Während bei Preisregulierung eine Strategie darin bestehen könnte, die Kosten zu Lasten der Versorgungsqualität zu verringern, wird in der Anreizregulierung dem grundlegenden Trade-off zwischen Kosten und Qualität zusätzlich mit dem Q-Element begegnet. Dieses führt zu einer monetären Bewertung der Versorgungsqualität, die sich im Falle unterdurchschnittlicher Ausprägung gewinnmindernd auswirkt. Daher entsteht ein Bedarf nach Asset Management Strategien, die zusätzlichen Kosten Rechnung tragen, die durch Änderung der Versorgungsqualität entstehen.

Betreuer: Dipl.-Ing. Christian Hille

Wenk, Moritz

Konzeptionelle Entwicklung von Prüf- und Zertifizierungsverfahren für den Anschluss von Smart Grid Komponenten und Elektrofahrzeugen

Aus dem zunehmenden Anschluss dezentraler Energiewandlungseinheiten, steuerbarer Verbraucher sowie Elektrofahrzeugen in den Verteilungsnetzen resultieren neue Systemverhalten, wie beispielsweise bidirektionale Lastflüsse, Spannungsschwankungen oder Oberschwingungen. Um die daraus resultierenden neuen Herausforderungen technisch sicher beherrschen zu können, werden derzeit eine Vielzahl von innovativen Betriebskonzepten (Smart Grids, Vehicle to Grid) und neuartigen Komponenten (intelligente Ortsnetzstatio-

nen) entwickelt. Vor dem Einsatz dieser Komponenten im aktuellen Netzbetrieb muss jedoch die Anwendbarkeit sowie Sicherheit durch Prüf- und Zertifizierungsverfahren unter Beweis gestellt werden.

Ziel dieser Diplomarbeit ist daher die konzeptionelle Entwicklung von innovativen Prüf- und Zertifizierungsverfahren für den Anschluss und Betrieb neuartiger Netzkomponenten im Bereich der Smart Grids sowie der Elektrofahrzeuge.

Betreuer: Dipl.-Ing. Michael Peitz

Masterarbeiten

Abbas, Achmadi

Bestimmung der Korrelationen zwischen den zur Alterung relevanten Faktoren von Transformatoren

Die Zuverlässigkeit und Lebensdauer von Transformatoren wird stark beeinflusst durch den Zustand ihrer Isolation. Zur Identifikation der Lebensdauer wird im Normalfall die Öl-Papierisolation herangezogen. Dies resultiert aus dem irreversiblen Zersetzungsprozesses der Isolation, wodurch der Isolation starke Aufmerksamkeit zukommt.

Diese Arbeit fokussiert sich auf die Entwicklung eines Ansatzes, welcher die Abschätzung der Lebensdauer und des Zustands der Transformatoren ermöglicht. Dabei werden die Regressions- und Kurven Fitting Toolboxes von Matlab verwendet, um die Korrelation relevanter Einflussparameter auf das Alterungsverhalten zu untersuchen.

Mittels der Korrelationsanalyse konnten die Parameter Furan-, Gas-, Feuchtegehalt, Grenzflächenspannung sowie Säurezahl als Haupteinflussfaktoren auf den Alterungsprozess identifiziert werden. Als Korrelati-

onsmodell wurden Multi Eingang / Single Ausgang sowie Single Input / Single Output verwendet. Die Ergebnisse liefern sehr informationsreiche Aussagen über den aktuellen Zustand der Isolierung sowie die Möglichkeit zur Abschätzung des Alters und der Restlebensdauer der Transformatoren.

Betreuer: M. Sc. Tirinya Cheumchit

Bokhari, Mubashir Riaz

Experimentelle Untersuchung der dielektrischen Wiederverfestigung in Isolierstoffdüsen unter der Berücksichtigung verschiedener Einflussparameter

In Selbstblasleistungsschaltern dampft auch einige Millisekunden nach dem Stromnulldurchgang noch Material aus der Oberfläche der Isolierstoffdüsen aus. Dieser Effekt resultiert aus der Aufheizung des Düsenmaterials durch den hohen Stromfluss im Schaltlichtbogen beim Abschaltvorgang im Leistungsschalter. Der Durchschlagsprozess in diesen Isolierstoffdüsen unmittelbar nach Verlöschen des Hochstromes ist bis jetzt noch nicht vollständig verstanden. Deshalb werden im Rahmen dieser Masterarbeit verschiedene Einflussparameter untersucht und deren Auswirkung auf die dielektrische Wiederverfestigung in Isolierstoffdüsen.

Betreuer: Dr.-Ing. Andreas Kurz, Dipl.-Ing. Gregor Nikolic

Muslim, Agus

Beitrag zur Modellreduktion von Umrichtern für schutztechnische Berechnungen in Verteilungsnetzen mit hoher Durchdringung dezentraler Einspeiser

Ein dramatischer Anstieg in den Anschlusszahlen dezentraler Energieerzeugungseinheiten führt zu einer Beeinflussung bestehender Schutzkonzepte. Für eine

Kurzschlussberechnung sind derzeit keine geeigneten Modelle vorhanden, welche eine Simulation von an das Niederspannungsnetz angeschlossenen Wechselrichtern (PV-Anlagen) ermöglichen.

Durch Modellierung der PV Wechselrichter kann der Einfluss von diesen innerhalb der Kurzschlussberechnung analysiert werden. Das Modell ermöglicht damit die Untersuchung des Einflusses von Wechselrichtern auf existierende Schutzsysteme.

In dieser Arbeit werden PV Inverter hierarchisch modelliert für Kurzschlussanalysen. Sensitivitätsanalysen zeigen, dass die Filterparameter und Stromreglereinstellungen einen signifikanten Einfluss auf das Kurzschlussverhalten der Komponente zeigen. Mittels der Reduktionsmethode wurden äquivalente Modelle eingeführt um die Berechnungszeiten zu verringern. Simulationen zeigten, dass der Anschluss von bis zu 2 PV Invertern existierende Schutzsysteme nicht keinen signifikant beeinflusst.

Betreuer: Dipl.-Ing. Tilman Wippenbeck

Bachelorarbeiten

Aßhoff, Jonas

Technisch-ökonomische Analyse europäischer Verteilungsnetze unter Einfluss der Elektromobilität

Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Helmschrott

Bechmann, Mario

Analyse marktbasierter Verfahren zur Allokation von begrenzten Übertragungsnetzkapazitäten innerhalb Europas

Betreuer: Dipl.-Wirt.-Ing. Eva Szczechowicz

Bertram, Reinhold

Modell zur Simulation der Entwicklung des deutschen Stromerzeugungssektors

Betreuer: Dipl.-Wirt.-Ing. Baris Özalay

Beulertz, Daniel

Potentialanalyse des Einsatzes erneuerbarer Energieträger in Europa mit ihren technischen und ökologischen Auswirkungen

Betreuer: Dipl.-Wirt.-Ing. Baris Özalay

Ehlers, Timo

Entwicklung aggregierter Speichermodelle von Elektromobilen unter Berücksichtigung von Unsicherheiten

Betreuer: Thomas Pollok, M.Sc.

Felbier, Daniel

Szenarioanalyse zur Bewertung des Einflusses von Redispatch und Netzausbaumaßnahmen im Hinblick auf die Ausgestaltung von Kapazitätsmärkten

Betreuer: Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Thomas Dederichs, Dipl.-Ing. Hendrik Natemeyer

Felling, Tim

Ökonomische und technische Analyse energieautarker Mobilfunksendeanlagen unter Einsatz erneuerbarer Energien

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

Feustel, Felix

Analyse der Sensitivität der Zuverlässigkeit von Schaltanlagen auf den Ausfall einzelner Betriebsmittel

Betreuer: Dipl.-Ing. Christian Hille

Haverkamp, Simon

Entwicklung und Implementierung von Ladestrategien für Elektrofahrzeuge in europäischen Verteilungsnetzen

Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Helmschrott

Hiegemann, Jens

Szenarioanalyse zur zukünftigen Ausgestaltung der Netznutzungsentgelte und Bestimmung des Einflusses möglicher Änderungen auf die Verteilungsnetze

Betreuer: Dipl.-Ing. Sebastian Winter, Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Thomas Dederichs

Ihl, Stefan

Potentialanalyse verteilter Speichersysteme zur Erhöhung von Systemflexibilität

Betreuer: Dipl.-Wirt.-Ing. Bartholomäus Wasowicz, Dipl.-Ing. Stefan Kregel

Janzen, Ikarus

Potentialanalyse des Einsatzes erneuerbarer Energieträger unter Berücksichtigung möglicher Subventionsstrategien

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

Jiang, Ruth

Potentialanalyse des Erzeugungsmanagements erneuerbarer Energien unter Marktbedingungen

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

Kocks, Benedikt

Modellierung einer straßengenauen Zuordnung der Auswirkungen lokaler Emissionen der Elektromobilität

Betreuer: Dipl.-Wirt.-Ing. Eva Szczechowicz

Köhn, Pascal

Verfügbarkeitsanalyse von Schaltanlagen bei Variation der Instandhaltung

Betreuer: Dipl.-Ing. Christian Hille

Körner, Hendrik

Vergleichende Ökobilanzierung eines SF₆-isolierten Betriebsmittels der elektrischen Energieversorgung

Betreuer: Dipl.-Ing. Gregor Nikolic, Dipl.-Wirt.-Ing. Eva Szczechowicz

Körner, Hendrik G. E.

Vergleichende Ökobilanzierung eines SF₆-isolierten Betriebsmittels der elektrischen Energieversorgung

Betreuer: Dipl.-Ing. Gregor Nikolic, Dipl.-Wirt.-Ing. Eva Szczechowicz

Koll, Sarah

Ökonomische Bewertung der durch Elektrofahrzeuge verursachten Ausbaumaßnahmen in europäischen Verteilungsnetzen

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

Kozlov, Kostyantyn

Implementierung eines Berechnungsverfahrens für asymmetrische Lastflüsse in Niederspannungsverteilungsnetzen mit dezentralen Erzeugern und Speichern

Betreuer: Dipl.-Ing. Tilman Wippenbeck, Dipl.-Wirt.-Ing. Andreas Roehder

Kulms, Tom

Anforderungen an Mess – und Überwachungstechnologien in zukünftigen Verteilungsnetzen zur Einbindung in eine zustandsbasierte Instandhaltung

Betreuer: Dipl. Wirt.-Ing. Alexander Gitis, Dipl.-Ing. Michael Peitz

Kunert, Stephan

Analyse bestehender Ansätze und Richtlinien für Ökobilanzen im Themengebiet der Elektromobilität sowie Entwicklung geeigneter Anwendungsfälle

Betreuer: Dipl.-Wirt.-Ing. Eva Szczechowicz

Labsin, Alexander

Sensitivitätsanalyse der Einflüsse von Elektrofahrzeugen auf Niederspannungsnetze

Betreuer: Thomas Pollok, M.Sc.

Maahsen, Christof

Konzeptionierung einer Auswertungsmethodik elektromobiler Fahrzeugdaten aus Feldversuchen

Betreuer: Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Markus Gödde, Dipl.-Ing. Claas Matrose

Madey, Matthias

Untersuchungen zur Frequenzhaltung in zukünftigen Energiesystemen mit einem hohen Anteil umrichterbasierter Lasten und Erzeuger

Betreuer: Dipl.-Wirt.-Ing. Andreas Roehder, Dipl.-Ing. Hendrik Natemeyer

Massmann, Janek

Analyse des (n-1)-Kriteriums und dessen Zukunft in Übertragungsnetzen

Betreuer: Dipl.-Ing. Hendrik Natemeyer

Meyer, Marian

Algorithmen für die Spannungsregelung in Niederspannungsverteilungsnetzen mittels automatischer Regeleinheiten in Ortsnetzstationen

Betreuer: Dipl.-Ing. Claas Matrose

Nautz, Gerrit Alexander

Untersuchungen zur Temperaturmessung in lichtbogenbeanspruchten Anordnungen

Betreuer: Dipl.-Ing. Gregor Nikolic

Nießen, Florian

Szenarioanalyse zur Bewertung zukünftiger Engpässe und entsprechender Lösungsansätze im europäischen Übertragungsnetz

Betreuer: Dipl.-Ing. Hendrik Natemeyer

Pasch, Cornelia Helen

Entwurf einer möglichen Ausgestaltung eines Qualitätsindexes für das Transportnetz

Betreuer: Dipl.-Ing. Christian Hille, Dipl.-Ing. Michael Peitz

Philipps, Roland

Sensitivitätsanalysen zur Beeinflussung der elektrischen Eigenschaften von Erzeugungsanlagen durch Variation der Netzesatzdaten

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

Rocktäschel, Florian

Entwicklung einer Methodik zur ganzheitlichen Bewertung lastferner, solarthermischer Energiewandlung

Betreuer: Dipl.-Ing. Sebastian Winter

Schmidt, Fabian

Untersuchung der dielektrischen Festigkeit alternativer Isoliergase

Betreuer: Dipl.-Ing. Gregor Nikolic

Schultz, Tim

Rekonstruktion von Potentialverteilungen in Leistungsschalteranordnungen mittels kapazitiver Feldsonden

Betreuer: Dipl.-Ing. Matthias Hoffacker

Schymanietz, Martin

Technische Ökoeffizienz der Kombination von Elektrofahrzeugen mit dezentralen Energieerzeugungsanlagen innerhalb eines Vehicle2Home Konzepts

Betreuer: Dipl.-Wirt.-Ing. Eva Szczechowicz

Seemann, Stefan

Analyse neuartiger Überlastsituationen in Verteilungsnetzen mit traditioneller Netz-

schutzausprägung und dezentralen Einspeisern

Betreuer: Dipl.-Ing. Tilman Wippenbeck

Sieberichs, Marius

Potentialanalyse des Einsatzes von Geothermie als Teil einer nachhaltigen Energieversorgung

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

Steber, David

Optimierung des Betriebs dezentraler Wandlungseinheiten im Rahmen virtueller Kraftwerke unter Berücksichtigung von Unsicherheiten

Betreuer: Thomas Pollok, M.Sc.

Sung, Daniel

Szenarien zur Entwicklung des konventionellen europäischen Kraftwerksparks

Betreuer: Dipl.-Wirt.-Ing. Baris Özalay

Tecklenburg, Julia

Analyse ökologischer Folgen und technischer Anforderungen der Einbindung des nordafrikanischen Übertragungsnetzes in das europäische Verbundnetz

Betreuer: Dipl.-Ing. Hendrik Natemeyer, Dipl.-Ing. Martin Scheufen

Tünnerhoff, Philipp

Analyse und Vergleich der Spannungsqualität in Niederspannungsverteilungsnetzen

Betreuer: Dipl.-Ing. Claas Matrose

von Gehlen, Sophia

Szenarioanalyse zur Ökobilanzierung von Elektrofahrzeugen und zugehöriger Infrastruktur

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

vor dem Berge, Markus

Analyse und Vergleich von Betriebsmittelauslastung und Symmetrie in Niederspannungsverteilungsnetzen

Betreuer: Dipl.-Ing. Claas Matrose

Weltzel, Nicolas

Analyse und Modellierung der elektrischen und thermischen Energiebereitstellung auf Gebäudeebene

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

Wronski, Tobias

Entwicklung eines intelligenten Monitorings für Kühlsysteme von Leistungstransformatoren

Betreuer: Dipl.-Ing. Michael Peitz

Zoschke, Markus

Analyse der technischen und ökonomischen Entscheidungskriterien und des Informationsbedarfs bei der Planung von Kraftwerksfahrplänen

Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Helmschrott

Studienarbeiten

Glinka, Felix

Analyse und Bewertung dezentraler Koordinationsmechanismen zur Steuerung flexibler Verbraucher und Energiewandlungseinheiten

Betreuer: Thomas Pollok, M.Sc.

Hartmann, Bodo

Untersuchungen zur Temperatur in einem Selbstblasleistungsschalter

Betreuer: Dipl.-Ing. Gregor Nikolic

Heinrich, Daniel

Integration und Validierung eines Datenerfassungssystems für einen Feldversuchensatz

Betreuer: Dipl.-Ing. Jörg Küfen

Hospelt, Andreas

Experimentelle Untersuchung der dielektrischen Wiederverfestigung heißer Löschgase in Isolierstoffdüsen

Betreuer: Dr.-Ing. Andreas Kurz, Dipl.-Ing. Gregor Nikolic

Kronewald, Artur

Potentialanalyse solarer Energiewandlung als Teil einer zukünftigen Energieversorgungsstrategie

Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Dederichs

Lewtschenko, Daniel

Entwicklung und Programmierung einer Steuerungsumgebung für ein Sekundärtechnik-Prüfgerät für manuelle und automatische Prüfungen

Betreuer: Dipl.-Ing. Holger Krings, Dipl.-Ing. Peter Wittlinger, Dipl.-Ing. Thomas Dederichs

Rügemer, Jonas

Untersuchung der Anforderungen an Informations- und Kommunikationssysteme zur Realisierung komplexer Ladestrategien von Elektrofahrzeugen

Betreuer: Dipl.-Ing. Claas Matrose, Dipl.-Ing. Thomas Dederichs

Sichermann, Jörg

Modellierung der Interaktion zwischen dem Schaltlichtbogen eines hybriden DC-Leistungsschalters und einem DC-Netz

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

Turinsky, Johannes

Modellierung des charakteristischen Fahrverhaltens im Individualverkehr unter Anwendung probabilistischer Methoden

Betreuer: Thomas Pollok, M.Sc.

Wendland, Erich

Untersuchung zu ökonomischen und ökologischen Auswirkungen der Abscheidung und Speicherung von CO₂

Betreuer: Dipl.-Wirt.- Ing. Baris Özalay, Dipl.-Kfm. Tobias Karmann, M. Sc.

Projektarbeiten

Narayanan, Badrinath Srinivasan; Murthy, Krithika Sridhar; Raphael, Rijo Jude; Ramesh, Manjunath Hebbale

Entwicklung eines Bewertungskonzepts für den Einsatz SF₆-freier Technologien in gasisolierten Schaltanlagen





Das Institut



Chronik 2011

03.01.11

Erster Arbeitstag von Stylianos Filippidis und Ann-Kathrin Meinerzhagen

05.01. – 07.01.11

Teilnahme am CIGRE WG A3.24-Meeting in Beznau, Schweiz

Gerhard Pietsch

17.01. – 19.01.11

Teilnahme am VDE-Seminar „Schaltberechtigung für Mittel- und Hochspannungsanlagen“ in Frankfurt

Bernhard Fuchs, Mathias Knaak, Max Keller

20.01.11

Erster Arbeitstag von Manuel Probst, Werkstatt

21.01.11

Neujahrstreffen des IFHT mit Sprottenessen

25.01.11

Studenten-Exkursion zum VDE-Prüfzentrum nach Offenbach
Exkursionsleiter: Jens Knauel

28.01.11

Studentenexkursion zum Hochspannungskabelwerk Charleroi, Belgien

Gregor Brammer

01.02.11

Erster Arbeitstag von Michael Peitz

01.02.11

Teilnahme am ew-Informationstag „Mittelspannungsschaltanlagen – Aktuelles aus Normung, Bau und Betrieb“ in Fulda (Beitrag: Druckberechnung in Schaltanlagenräumen bei Störlichtbögen)

Gerhard Pietsch

02.02. – 07.02.11

DAAD-Vorauswahlprüfung für Stipendientbewerber aus der Russ. Föderation (Forschungsaufenthalte) und Auswahlgespräche mit Bewerbern für Studienstipendien in Moskau

Teilnehmer: Gerhard Pietsch

16.02. - 17.02.11

Teilnahme an der Nexans-Kabelakademie in Rust

Gregor Brammer, Michael Keßler

22.02.11

Teilnahme am Umweltforum „Arbeitsgruppe Lärm und LCA“ in Wuppertal

Eva Szczechowicz

23.02.2011

Promotion von Tilman Ringelband, RWTH Aachen, zum Thema „Unsicherheit witterungsabhängiger Übertragungskapazitäten bei der Netzbetriebsplanung“

Referent: Hans-Jürgen Haubrich, Korreferent: Armin Schnettler

03.03.11

Fettdonnerstag mit Fassanstich in der Hochspannungshalle

06.03.11

Traditioneller IFHT-Hochspannerball

31.03.11

Letzter Arbeitstag von Tirinya Cheumchit und Andrey Mashkin

26.04. – 29.04.11

Teilnahme an der Cigresitzung B3.17, B2.25 und B3.30 in Helsinki

Andreas Kurz

26.04. – 29.04.11

Teilnahme an dem Cigré Meeting der Gruppe C3 am Toten Meer, Israel

Eva Szczechowicz	Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association" in Khon Kaen (Thailand)
02.05.11 Erster Arbeitstag von Andreas Roehder	
06.05.11 Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses zum Abschluss des AiF-Vorhabens „Reduzierung der Druckbeanspruchung elektrischer Anlagen im Störlichtbogenfall“ in Aachen	20.05. – 22.05.11 Mannheim Marathon, Organisator: Claas Matrose Teilnehmer: Sawarkar Abhijit, Volker Beiss, Gregor Glehn, Hanna Johnen, Christoph Lütke-Lengerich, Claas Matrose, Andreas Meyer, Manjunath Ramesh, Christian Scheefer, Armin Schnettler, Suganthan Shanmugalingam, Sergej Starschich, Ragav Sathis Chinnu, Badrinath Srinivas Narayan, Markus Vor dem Berge
Armin Schnettler, Gerhard Pietsch, Daniel Eichhoff	
11.05. – 12.05.11 Teilnahme am 6. Braunschweiger Supraleiterseminar in Braunschweig	23.05. – 25.05.11 Teilnahme am CIGRE WG A3.24-Meeting in Montreal, Kanada
Daniel Winkel	Gerhard Pietsch
12.05. – 19.05.11 Teilnahme an der „IEEE 18th International Pulsed Power Conference“ in Chicago	30.05. – 03.06.11 Teilnahme an „The 4th Chaotic Modeling and Simulation International Conference“ in Agios Nikolaos, Griechenland
Christian Hille	Matthias Hoffacker
15.05. – 19.05.11 Durchführung des Seminars „Schutz- und Leittechnik“ in Laterns, Klaus, Dornbirn, Bregenz und Bürs mit 12 Studierenden	01.06.11 Erster Arbeitstag von Fabian Potratz und Christopher Kissing
Tilman Wippenbeck	
16.05. – 17.05.11 Teilnahme am Isolierstoff-Kolloquium in Braunschweig	06.06. – 09.06.11 Teilnahme an der CIRED 2011 in Frankfurt
Armin Schnettler, Michael Keßler, Christoph Roggendorf, Daniel Winkel	Stefan Kregel, Thomas Helmschrott, Thomas Pollok, Eva Szczechowicz, Tilman Wippenbeck
18.05. – 20.05.11 Teilnahme am High Volt-Kolloquium in Dresden	14.06.11 Erster Arbeitstag von Stephan Rath
Michael Keßler, Jens Knauel, Andreas Kurz, Gregor Nikolic, Daniel Winkel	
20.05.11 Verleihung des „Best Paper Award“ an Christian Hille und Montri Srisupha für die Veröffentlichung „Diagnostic of Circuit Breaker Interrupter by Means of a Frequency Response Analysis“ im Rahmen der „8th Electrical Engineering/Electronics,	13.06. – 17.06.11 Pfungstexkursion nach Regensburg, München und Stuttgart
	17.06.11 Springorum-Denk Münze an Daniel Eichhoff und Thomas Helmschrott
	19.06. – 22.06.11

<p>Teilnahme an Ji-Cable Konferenz in Versailles, Paris Gregor Brammer, Ralf Puffer</p> <p>20.06. – 22.06.11 Teilnahme an der IEEE PowerTech Konferenz in Trondheim Hendrik Natemeyer</p> <p>01.07.11 Promotion von Rummiya Vilaithong an der Universität Stuttgart zum Thema „Models for Thermal and Mechanical Monitoring of Power Transformers“ Referent: Stefan Tenbohlen, Korreferent: Armin Schnettler</p> <p>01.07.11 Erster Arbeitstag von Alexander Gitis und Robert Tempels</p> <p>05.07.11 Promotion von Jose Manuel Aneceto Calero zum Thema „Modelling of High Voltage Hybrid Fault Current Limiters for Design Evaluation“ an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETH) Referent: Klaus Fröhnlich, Korreferenten: Armin Schnettler Christian Franck</p> <p>07.07. -09.07.11 DAAD-Auswahlsitzung Studienstipendien für Absolventen Deutscher Auslandsschulen (Verlängerungen) in Bonn-Bad Godesberg Teilnehmer: Gerhard Pietsch</p> <p>08.07.11 Exkursion zum Schaltanlagenseminar zur Alstom Grid GmbH und zur Stawag in Aachen (Schaltanlage Aachener Kreuz) Michael Peitz</p> <p>19.07.11 Promotion von Andreas Kurz zum Thema „Charakterisierung der dielektrischen Wiederverfestigung alternativer Löschgase in Isolierstoffdüsen“</p>	<p>Referent: Armin Schnettler, Korreferent: Klaus Fröhnlich</p> <p>19.07.11 Letzter Arbeitstag Manuel Probst</p> <p>04.08.11 – 05.08.11 Workshop der Abteilung „Nachhaltige Energiesysteme“ in St. Vith, Belgien</p> <p>15.08.11 Erster Arbeitstag von Alexander Stroband</p> <p>18.08.11 IFHT-Betriebsausflug zum Innenhafen Duisburg</p> <p>21.08. – 26.08.11 Teilnahme an „ISH 2011“ Konferenz in Hannover Gregor Brammer, Christian Hille, Matthias Hoffacker, Michael Keßler, Jens Knauel, Gregor Nikolic, Christoph Roggendorf, Anja Strauchs, Daniel Winkel</p> <p>28.08. – 31.08.11 Teilnahme an der “Life Cycle Management Conference 2011” in Berlin Eva Szczechowicz</p> <p>04.09. – 09.09.11 Konferenzteilnahme FSO 2011 in Nove Mesto na Morave, Tschechische Republik Matthias Hoffacker, Gregor Nikolic</p> <p>12.09. – 13.09.11 Teilnahme am CIGRE WG A3.24-Meeting in Wien Gerhard Pietsch</p> <p>19.09. – 03.10.11 Gastvorlesungen an der Huazhong University of Science & Technology (HUST) in Wuhan, China Gerhard Pietsch</p> <p>20.09.-22.09.11 7. Ökobilanz Werkstatt an der RWTH – Gastgeber: IFHT und HumTec/eet – ethics for energy technology</p>
--	--

Teilnehmer: Eva Szczechowicz	12.11.11
25.09. – 29.09.11 Konferenzteilnahme an der SDEWES Konferenz in Dubrovnik Baris Özalay	„Hochwissenschaftliches Kolloquium“ und Verleihung des Hektikerpreises „Der Mann mit der ruhigen Kugel“ an Christoph Roggendorf
11.10.11 Verleihung des RWE-Zukunftspreises an Hendrik Natemeyer	20.11. – 24.11.11 Durchführung des Seminars „Schutz- und Leittechnik“ in Laterns, Klaus, Dornbirn, Bregenz und Bürs mit 12 Studierenden Andreas Roehder, Tilman Wippenbeck
16.10.-19.10.11 Teilnahme an der IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena in Cancun (Mexiko) Anja Strauchs	25.11.11 Bartholomäus Wasowicz erhält den „Friedrich-Wilhelm-Preis“ für seine Diplomarbeit zum Thema „Entwicklung einer integrierten handelsbasierten Einsatz- und Ausbauplanung des deutschen Kraftwerksparks unter ökologischen Kriterien
17.10.11 Erster Arbeitstag von Sebastian Wetzeler	01.12.11 Erster Arbeitstag von André Wagner
18.10. -19.10.11 DAAD-Stipendiatenseminar für Absolventen deutscher Auslands- und Sprachdiplomschulen in Berlin Teilnehmer: Gerhard Pietsch	06.12.11 Besuch einer Gruppe "ziviler" Energietechniker der Bundeswehr am IFHT Betreuer: Stefan Krengel, Maximilian Keller
24.10. – 26.10.11 DAAD-Auswahlsitzung zur Vergabe von Stipendien für Kandidaten aus der Russischen Föderation nach dem Lomonossov-Programm in Moskau Teilnehmer Gerhard Pietsch	09.12.11 Überreichung des Trianel-Preises an Simon Koopmann und des STAWAG-Preises an Hendrik Natemeyer
07.11.11 Promotion von Torben Dietermann zum Thema „Systembezogene Risikobewertung von Betriebsmitteln der Elektrischen Energieversorgung“ an der Technischen Universität Darmstadt, Referent: Gerd Balzer, Korreferent Armin Schnettler, RWTH Aachen	22.12.11 Promotion von Christian Hille zum Thema „Simulatorische Analyse und Optimierung von Asset Management Strategien im regulierten Umfeld der Elektrizitätsversorgung“ Referent: Armin Schnettler, Korreferent: Gerd Balzer
08.11. - 09.11.11 ETG Kongress in Würzburg Stefan Krengel, Tilman Wippenbeck	31.12.11 Letzter Arbeitstag von Thomas Dederichs, Stylianos Filippidis und Robert Tempels
09.11.11 Verleihung der Preise der Otto-Junker-Stiftung an Daniel Eichhoff und Thomas Helmschrott	

Veröffentlichungen

Stefan Federlein

Schadens- und Störungsstatistiken zur Optimierung der Instandhaltung von Hochspannungs-Betriebsmitteln

Der Instandhaltungs-Berater, 47. Auflage, ISBN 978-3-8249-1267-4, TÜV Media GmbH, Köln 2010

Til Kristian Vrana, Christian Hille

A novel control method for dispersed converters providing dynamic frequency response

Electrical Engineering – Archiv für Elektrotechnik, Springer Berlin/Heidelberg 2011

Eva Szczechowicz, Thomas Pollok, Armin Schnettler

Economic Assessment of Electric Vehicle Fleets Providing Ancillary Services

21st International Conference on Electricity Distribution CIRED, Paper 0967, Frankfurt, 6-9 June 2011

Stefan Kregel, Sepideh Doroudian, Armin Schnettler

Modelling approach to Assess the Impact of Heat and Electricity Storage on Distribution Systems

21st International Conference on Electricity Distribution CIRED, Paper 0835, Frankfurt, 6-9 June 2011

Thomas Helmschrott, Martin Scheufen, Armin Schnettler

Integrated Analysis of Traffic and Power Flows

21st International Conference on Electricity Distribution CIRED, Paper 0686, Frankfurt, 6-9 June 2011

Thomas Pollok, Claas Matrose, Thomas Dederichs, Armin Schnettler, Eva Szczechowicz

Classification and Comparison of Multi Agent Based Control Strategies for Electric Vehicles in Distribution Networks

21st International Conference on Electricity Distribution CIRED, Paper 0974, Frankfurt, 6-9 June 2011

Paul Gregor Nikolic, Andres Kurz, Daniel Eichhoff and Armin Schnettler

CDF-Simulation as a Tool for Circuit Breaker Diagnostics and Maintenance

XVII International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Hannover 2011

Matthias Hoffacker, Jens Knauel, Paul Gregor Nikolic, Andreas Kurz, Armin Schnettler

A New Method to Measure the Spatial Arc Resistance Distribution of an Axial Blown Switching Arc

XVII International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Hannover 2011

Christoph Roggendorf, Anja Strauchs, Andrey Mashkin, Armin Schnettler

Influence of the filling degree of microspheres on the breakdown voltage of syntactic foam

XVII International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Hannover 2011

C. Roggendorf, M. Kessler, A. Schnettler
Modification of the mechanical properties of epoxy resin with polymeric microspheres
International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Hannover, Germany, August 2011

Ionut Trintis, Stephan Thomas, Tobias Blank, Christoph Roggendorf, Stig Munk-Nielsen, Remus Teodorescu
Bidirectional Converter Interface for a Battery Energy Storage Test Bench
14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'11 ECCE), Birmingham, United Kingdom, August 2011

Matthias Hoffacker, Andreas Kurz, Gregor Nikolic, Daniel Eichhoff
Influence of the Blow Gas Pressure on the Thermal Interruption Capability of a Non-SF6-Blast Circuit Breaker Model
XVIX Symposium on Physics of Switching Arc, Brno, Czech Republic 2011

Andreas Kurz, Christoph Kahlen, Gregor Nikolic, Matthias Hoffacker, Daniel Eichhoff
Investigations on the Influence of Alternative Nozzle Geometries on the Switching Behaviour of a Circuit Breaker Prototype
XVIX Symposium on Physics of Switching Arc, Brno, Czech Republic 2011

Andreas Kurz, Martin Seeger, Gregor Nikolic, Daniel Eichhoff, Armin Schnettler
Understanding the Dielectric Recovery Characteristic of Hot Air in Insulating Nozzles
XVIX Symposium on Physics of Switching Arc, Brno, Czech Republic 2011

R. Kozakov, G. Gött, Daniel Eichhoff, Andreas Kurz, D. Uhrlandt
Spectroscopic Diagnostics of a Switching Arc in Carbon Dioxide Atmosphere
XVIX Symposium on Physics of Switching Arc, Brno, Czech Republic 2011

Jens Knauel, Gregor Brammer, Armin Schnettler, Christian Cornelissen
Detection of state of cure of EPDM in medium voltage cables using ultrasound diagnosis
XVII International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Hannover 2011

Matthias Hoffacker, Paul Gregor Nikolic, Daniel Eichhoff, Andreas Kurz
Influence of the simulation model on the spatial arc resistance distribution of an axially blown switching arc Chaotic Modeling and Simulation
Chaotic Modeling and Simulation (CMSIM) vol. 1, pp. 139-146, 2011

Daniel Eichhoff, Andreas Kurz, Matthias Hoffacker, Armin Schnettler:
Technical and Economical Assessment of an Industrial Medium Voltage Grid with DC Technology
MatPost 11, 4th European Conference on HV & MV Substation Equipments, Lyon, France, 2011

Anja Strauchs, Armin Schnettler
Enhancements of Epoxy Resin Based Syntactic Foam by Inner Interface and Matrix Modifications
IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Cancun, Mexico, October 2011

Anja Strauchs, Andrey Mashkin, Armin Schnettler

Impact of SiO₂ Nanoparticles on the Properties of Syntactic Foam

XVII International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Hannover 2011

Thomas Smolka, Thomas Dederichs, Markus Gödde, Armin Schnettler

Potentiale und Rahmenbedingungen für einen flächendeckenden Einsatz von Smart Metering für Stadtwerke

ETG Kongress 2011, Würzburg, 08./09.11.2011

Hendrik Natemeyer, Martin Scheufen, Sebastian Winter, Thomas Dederichs, Armin Schnettler

Identification of environmentally relevant network hotspots

IEEE PowerTech Conference, Trondheim, Norway, 19.-23. Juni 2011

Gregor Brammer, Armin Schnettler

Measurement of temperature in XLPE insulation of power cables using ultrasonic diagnosis

XVII International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Hannover 2011

Michael Fiedeldey, Carmen Albrecht, Simone Herz, Ernst-Peter Meyer, Stefan Krengel, Armin Schnettler

Anwendung statischer und dynamischer Strompreis-Anreizmodelle im Virtual Power System Allgäu / Implementation of static and dynamic price-incentive models in the Virtual Power System Allgäu

ETG Kongress 2011, Würzburg, 08./09.11.2011, Paper 2.10

Gregor Brammer, Armin Schnettler

Online-monitoring of the conductor temperature in MV power cable production using ultrasonic diagnosis

Ji-Cable '11, 8th International Conference on Insulated Power Cables, Versailles, Paris 2011

Daniel Winkel, Armin Schnettler

Investigations on AC Breakdown Field Strength of Syntactic Foam at Cryogenic Temperature

XVII International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Hannover 2011

Gregor Brammer, Armin Schnettler

Prototype for detection of delaminations in the sheath systems of high voltage power cables using ultrasonic diagnosis

Ji-Cable '11, 8th International Conference on Insulated Power Cables, Versailles, Paris 2011

Stefan Federlein, Bernhard Fuchs

Batteriespeichersysteme und Smart-Grid-Technologien

EW : das Magazin für die Energie-Wirtschaft. - Frankfurt, M. : EW-Medien und Kongresse. - ISSN: 1619-5795, 0013-5496. - 2011 (2011) 23, S./Art.: 53-64

Tilman Wippenbeck, Christian Hille, Armin Schnettler

Towards efficient rules for quantifying the impact of distributed generation on the functionality of traditional distribution protection systems

21st International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2011), Frankfurt, 6.-9. Juni 2011

Tilman Wippenbeck, Claas Matrose, Armin Schnettler

Nicht beobachtbare Innere Überlastsituationen in Niederspannungs- Verteilungsnetzen mit dezentralen Einspeisern und heute üblichen Schutzsystemen = Non-observable inner overload situations of low voltage distribution systems with decentralised infeed and traditional protection systems

ETG Kongress 2011, Würzburg, 08./09.11.2011

Baris Özalay, P. Frenzel, Rafaela Hillerbrand

Modeling and analysis of a sustainable global development with an integrated assessment Model

Proceedings of the 6th Dubrovnik conference on sustainable development of energy, water and environmental systems Dubrovnik, Croatia, 2011

Thomas Pollok, Eva Szczechowicz, Thomas Dederichs, Armin Schnettler, J. Eckstein

Optimal pooling of electric vehicles for ancillary markets under consideration of uncertain parameters.

SmartGrids and E-Mobility, 3rd European Conference, München, 17.-18. Oktober 2011

E. Szczechowicz, M. Scheufen, T. Pollok, T. Dederichs, A. Schnettler

Time dependency of emissions from energy generation influencing the life cycle management

5th Conference on Life Cycle Management (LCM 2011), Berlin, 28.-31. August 2011

Christian Hille, Stefan Federlein, Armin Schnettler, Bartosz Rusek

Reliability of Air insulated Substations as additional Information for Priority driven Maintenance

17th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), August 22-26 2011, Hannover, Germany

Montri Srisupha, Christian Hille

Diagnostic of Circuit Breaker Interrupter by Means of a Frequency Response Analysis

8th Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association, Thailand - Conference 2011

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

CFD Calculation of pressure rise due to internal AC and DC arcing in a closed container

IEEE Trans. Power Del. Vol. 26, No. 3 p. 1700 – 1709, 2011

Mikimasa Iwata, S. Tanaka, T. Miyagi, T. Amakawa, Gerhard Pietsch

Calculation of pressure rise due to fault arc in a closed container with a metal mesh
The 2011 Annual Meeting Record I.E.E. Japan, paper 6-248, p. 444, 2011

Pfingstexkursion 2011

Das IFHT bietet jedes Jahr in der Pfingstwoche eine technische Exkursion in eine Region in Deutschland oder dem nahen Ausland, um den Studenten Eindrücke aus der Praxis näher zu bringen.. Dieses Jahr wurden innerhalb der Woche drei Städte im süddeutschen Raum angesteuert. Die Fahrt startete am Pfingstmontag und führe uns über Regensburg, München und Stuttgart. Die Teilnehmer, bestehend aus 38 Studenten, 7 wissenschaftlichen Mitarbeitern und Prof. Schnettler, besuchten Schneider Electric, Maschinenfabrik Reinhausen, E.ON Kernkraft, TenneT TSO, Siemens und die EnBW Regeional AG.

Anreise nach Regensburg

Am Pfingstmontag den 13.06.2011 um 7:45 Uhr trafen sich alle Teilnehmer in Aachen, um die Reise in den Süden Deutschlands zu beginnen. Die Busfahrt gab uns Gelegenheit erste Bekanntschaften mit den Reisenden zu machen. Etwa um 15:00 Uhr kamen wir in unserem Hostel an, welches für die nächsten zwei Nächte unser Quartier sein sollte. Um die allgemeine Müdigkeit aus den Knochen zu vertreiben und das Regensburger Umland kennenzulernen, lud uns Prof. Schnettler kurz nach der Ankunft zum traditionellen Lauftraining entlang des Regens ein.



Abb. 1: Regensburg & Steinernen Brück

Regensburg

Erfrischt ging es dann in die Altstadt von Regensburg. Dort erwartete uns eine Mitarbeiterin der Maschinenfabrik Reinhausen (MR) mit einer Kollegin der Regensburger

Tourist Information, die uns aufgeteilt in zwei Gruppen den geschichtlichen Hintergrund des gut erhaltenen, mittelalterlichen Stadtkerns näher brachten. Am Abend lud uns die MR in die Spitalbrauerei ein, wo wir uns ein Bild von den Brau- und Kochkünsten der Regensburger machen konnten. Ein großer Teil der Gruppe konnte sich anschließend vom Regensburger Nachtleben überzeugen.

Schneider Electric

Am nächsten Morgen stand ein Besuch der Regensburger Niederlassung von Schneider Electric an. Die dort angestellten Ingenieure referierten engagiert über ihre dortigen Tätigkeiten sowie die Möglichkeiten für einen Einstieg. Die Präsentation des Standorts wurde durch eine Führung durch das Werk und die Testeinrichtungen abgerundet. Dort konnten wir beobachten, wie die Mitarbeiter Schaltanlagen für die Mittelspannungsebene fertigen und welcher Aufwand für Typ- und Stückprüfungen im Rahmen der Entwicklung und Fertigung betrieben werden muss. Nach unserem Rundgang konnten wir uns in der Kantine wieder stärken.

Maschinenfabrik Reinhausen

Unsere nächste Station war nur eine kurze Busfahrt entfernt. Nachdem jeder von uns einen Besucherpas und eine Geschenktasche überreicht bekam, wurde uns die

Maschinenfabrik Reinhausen vorgestellt. Der Weltmarktführer produziert im Regensburger Stadtteil Reinhausen Laststufenschalter für Leistungstransformatoren in einer hohen Fertigungstiefe. Nach einem Übersichtsvortrag und Erläuterung des Funktionsprinzips konnten wir die Fertigungsstätten in Augenschein nehmen. Danach haben wir uns die eindrucksvollen Prüfeinrichtungen besichtigt. Etwas neidvoll bestaunten die Hochspannungstechniker die riesige Hochspannungshalle. Nach einem Gruppenfoto lud uns MR in eine nahe gelegene typisch bayrische Gaststätte zum Abendessen ein. In diesem Rahmen bot sich den Studenten die Möglichkeit, ihre Fragen direkt an die Mitglieder der Unternehmensleitung zu richten und den Tag ausklingen zu lassen.

E.ON Kernkraftwerk Isar II

Damit war unser Aufenthalt in Regensburg beendet und unsere Reise führte uns zum leistungsstärksten Kernkraftwerk Deutschlands. Nachdem wir uns in einem kleinen Museum über die dahinter stehende Wissenschaft informiert haben, ging die Besichtigung los. Zuerst bestaunten wir die Wassermassen im Kühlturm, bevor wir durch den konventionellen Gebäudeteil mit Turbine und Generator geführt wurden. Zum Abschluss konnten sich die Teilnehmer an einer bayrischen Brotzeit stärken und im Vortrag etwas über den technischen Hintergrund und aktuelle politische Herausforderungen für Kernenergie.



Abb.2: KKW Isar II mit Schaltanlage

Schaltanlage Isar

Bei schönstem Wetter ging es zur Schaltanlage vor den Toren des Kraftwerks. Ein Mitarbeiter der TenneT TSO GmbH erwartete uns bereits, um uns durch die Anlage zu führen. Es stellte sich für die Studenten als wahre Mutprobe heraus, mit einem akustischen Hochspannungsprüfer die 380kV-Schiene auf Spannung zu prüfen. Den Teilnehmern wurden imposante Schaltheilungen auf einer leerlaufenden Leitung vorgeführt. Besonders beeindruckend waren die dabei entstehenden Lichtbögen.

München

Am späten Nachmittag kamen wir dann in unserem Hostel in München an und hatten den Rest des Tages zur freien Verfügung. Auch hier lud Prof. Schnettler zum gemeinsamen Erkunden der Stadt und des Schlossparks Nymphenburg ein, natürlich im Lauftempo. Auch die Biergärten im Englischen Garten waren ein beliebtes Ausflugsziel.

Siemens CT

In der, aufgrund der futuristisch anmutenden Architektur „Legoland“ genannten, Münchner Siemens Niederlassung besuchten wir am Donnerstag die Forschungsabteilung Siemens CT. In mehreren Fachvorträgen erfuhren wir, an welchen Projekten momentan gearbeitet wird. Nach einem Besuch im Firmenrestaurant besuchten wir die Labore und die Entwicklungsingenieure führten uns ihre neuesten Ideen im Themenfeld der Elektromobilität vor.

Paulaner Brauerei

Als Kontrastprogramm stand die Besichtigung der Paulaner Brauerei an. Nach einer Tour durch die Stationen des Bierbrauens gab es zum Schluss zur Brotzeit frisch gebräutes Bier. Da dies auch unser letzter

Abend war, lud uns Prof. Schnettler zum traditionellen gemeinsamen Abschlusssessen in die Augustiner Bräustubn ein. Dort konnten wir uns in gemütlicher Atmosphäre über das bisher Erlebte austauschen



Abb. 3: Schaltleitung der EnBW

EnBW Regional AG

Der letzte Tag startete, für manchen zu früh, mit der Anreise zur Schaltleitung der EnBW Regional AG in Esslingen, wo wir am späten Vormittag mit Erfrischungsgetränken empfangen wurden. Wir wurden über die Zusammenlegung der Schaltleitungen nach Esslingen und die damit einhergehende Erweiterung der dortigen Schaltleitung informiert. Nach einem Mittagessen in der Kantine konnten wir in der Leitwarte sehen wie der Netzbetrieb gesteuert wird. Den interessierten Studenten wurde mittels einer Simulation vorgeführt, wie in verschiedenen Fehlerfällen reagiert

wird. Schließlich, auf der Rückfahrt nach Aachen konnten die Teilnehmer auf eine lehrreiche, und zugleich auch erlebnisreiche Woche zurückblicken.



Abb. 4: Fassanstich beim Abschlusssessen

Organisation

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

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



Abb.5: Gruppenfoto in der Maschinenfabrik Reinhausen

Betriebsausflug zum Binnenschiffahrtsmuseum in Duisburg

Unser diesjähriger Betriebsausflug führte uns in das Binnenschiffahrtshafen in Duisburg, wo eine Museumsbesichtigung und eine anschließende Hafenrundfahrt auf dem Programm standen. Traditionell wurde der Tag bei einem gemütlichen Grillen bei Familie Schnettler abgerundet.

Führung durch das Museum

Pünktlich um 7:45 Uhr am 18.08.2011 startete der Reisebus von Aachen nach Duisburg. Mit dabei waren insgesamt 48 Institutsmitarbeiter, die sich auf einen interessanten und vor allem sehr sonnenreichen Tag freuen durften. Nach einer reibungslosen Anfahrt und einer sehr pünktlichen Ankunft blieb noch genug Zeit für ein aktualisiertes Institutsfoto, nachdem die Anzahl an Mitarbeitern erfreulicherweise im letzten Jahr stark gestiegen ist.



Abb. 1: Institutsgruppenfoto

Pünktlich um 10 Uhr startete auch schon die Führung durch das ansässige Museum, dem größten und umfassendsten Museum über die Geschichte der Binnenschiffahrt in Deutschland. Aufgeteilt in zwei Gruppen wurden wir durch das Museum geführt und wurden dabei sehr gut über die Geschichte der Binnenschiffahrt und ihrem speziellen Zusammenhang und Einfluss auf die Entwicklung der Stadt Duisburg informiert. In Duisburg steht europaweit

der größte Binnenhafen Europas und speziell die Stadt profitiert stark von jenem Standort, der damit einen der Hauptschlagsplätze in Europa darstellt. Im Duisburger Binnenhafen laufen jährlich mehr als 30.000 Schiffe an. Er ist eines der führenden Logistikzentren der Welt an der wichtigsten Wasserstraße des Kontinents, dem Rhein.

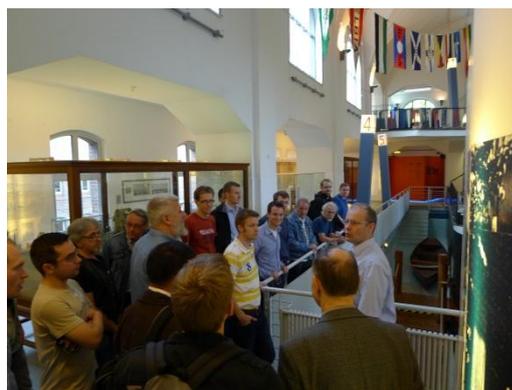


Abb. 2: Museumsführung

Im Anschluss an die Museumsführung haben wir uns mit einem Essen gestärkt und konnten dabei die Atmosphäre des internen Schiffahrtsmuseums „Schiffchen“ genießen.

Hafenrundfahrt

Den Höhepunkt und die größte Herausforderung angesichts der hohen Temperaturen, an einem der wärmsten Tage des Jahres, stellte die abschließende Hafenrundfahrt dar. Am Nachmittag erlebten wir eine zweistündige Hafenrundfahrt und sahen

das live, was wir bereits teilweise vorher im Museum erfahren hatten.



Abb. 3: Hafenrundfahrt

An Bord des Schiffes konnten neben den Sonnenstrahlen eine adäquate Bewirtung genossen werden. Insgesamt war es ein sehr erlebnisreicher und informativer Tag in Duisburg.

Ausklang bei Familie Schnettler

Der Ausklang des Tages in Form eines gemeinsamen Grillens bei Familie Schnettler im Garten gehört inzwischen fest zum Ablauf des Betriebsausflugs am IFHT.



Abb. 4: Grillen bei Familie Schnettler

Auch ein schweres Unwetter konnte die Stimmung nicht trüben und so folgten die meisten Kollegen der Einladung. Zum Buffet steuerte jeder Mitarbeiter etwas bei, so dass es neben dem Grillfleisch eine große Auswahl an Beilagen, Salaten und vor allem leckeren Desserts gab. Bis tief in die

Nacht wurde beisammen gegessen und der gesamte Tag abgerundet.

Kontakt

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

Dienstleistungsportfolio des IFHT

Das Institut für Hochspannungstechnik verfügt über Erfahrungen in vielen Bereichen der Hochspannungsmess- und –und prüftechnik, führt Materialuntersuchungen und Schadensanalysen durch und kann dabei auf eine umfangreiche Ausstattung zurück greifen.

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 den zutreffenden Normen durchgeführt. Bei Bedarf können kundenspezifische Prüfvorschriften 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 (15m³, -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 den institutseigenen Werkstätten 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

Siebte Ökobilanz Werkstatt

Vom 20. bis 22. September haben sich zahlreiche Nachwuchswissenschaftler und Senior Scientists aus Forschung und Industrie zur 7. Ökobilanz-Werkstatt des Netzwerks Lebenszyklusdaten in Aachen zusammengefunden. Die Gastgeber waren das Institut für Hochspannungstechnik an der RWTH und HumTec/eet – ethics for energy and technology. Die thematische Ausrichtung der Fachvorträge in diesem Jahr war das soziale Life Cycle Assessment (SLCA).

Soziale Ökobilanzen – Die Fachvorträge

Die dreitägige Ökobilanz Werkstatt startete mit Vorträgen zu unterschiedlichen Aspekten der sozialen Ökobilanzen, wobei der theoretische Fortschritt, der Einsatz von speziellen sozialen Datenbanken und Beispiele von anwendungsorientierten SLCA vorgestellt wurden. Nationale sowie internationale Gastreferenten aus Wissenschaft und Industrie standen auch nach ihren Vorträgen für Diskussionen bereit. Dies ermöglichte Neueinsteigern in die Thematik einen ersten Überblick von der Wichtigkeit und den Möglichkeiten von SLCA zu bekommen, aber auch den anwesenden Spezialisten detaillierte Fachdiskussionen zu führen.

Als zweiten Teil des Tages eröffnete Univ.-Prof. Schnettler mit einer Begrüßung an der RWTH Aachen und übergab anschließend das Wort an Frau Prof. Schebek, der Leiterin des Fachgebietes Industrielle Stoffkreisläufe an der TU Darmstadt, die den Rahmen und Ablauf der Ökobilanz Werkstatt erläuterte.

Als ersten Vortrag im Rahmen der Ökobilanz Werkstatt hielt traditionell Herr Prof. Walter Klöpffer zum Stand des Life Cycle Sustainability Assessments. Zum Abschluss des Tages wurde ein geselliges Abendessen mit allen Beteiligten eingenommen.

Vorträge im Rahmen der Werkstatt

Am 2. und 3. Tag stellen die 24 Teilnehmer der Ökobilanz Werkstatt ihre jeweiligen Forschungsthemen im Rahmen eines 15-minütigen Vortrags mit anschließender Diskussion vor. Nach den diskussionsreichen Tagen konnten alle bei einer Stadtführung durch Aachen zum Thema „Sagen und Märchen“ entspannen und anschließend beim Abendessen weiter diskutieren.



Abb. 1: Teilnehmer der 7. Ökobilanz Werkstatt in Aachen

Mehr Informationen zur Ökobilanzwerkstatt, den Fachvorträgen sowie den Vorträgen der Nachwuchswissenschaftler befinden sich auf der folgenden Internetseite: www.netzwerk-lebenszyklusdaten.de/

Die 8. Ökobilanz Werkstatt 2012 findet an der Uni Stuttgart statt.

Kontakt

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

Prüfverfahren für Ladesäulen von Elektrofahrzeugen

Mit zukünftig steigendem Anteil an Elektrofahrzeugen im deutschen Straßenverkehr steigt auch die Bedeutung der nötigen Ladeinfrastruktur. Zur Ladung von Elektrofahrzeugen existieren eine Vielzahl an Konzepten. Eine Möglichkeit ist das konduktive Laden der Fahrzeuge. Die dafür benötigten Ladesäulen stellen naturgemäß eine Schnittstelle zwischen dem Elektrofahrzeug, Stromnetz und Endkunden dar. Daher bestehen auch verschiedenste Anforderungen an Ladesäulen, welche eine Prüfung vor Inbetriebnahme der Ladesäule erfordern. Innerhalb dieses Artikels werden die im Testzentrum für Batteriespeicher und Smart Grid Technologien entwickelten elektrischen Prüfverfahren für AC- und DC-Ladesäulen vorgestellt.

Einleitung und Motivation

Der Anschluss von umrichterbasierten Technologien an das Stromnetz, führt zu einer Beeinflussung der Spannung auf Grund von resultierenden Oberschwingungen. Photovoltaikanlagen, Elektrofahrzeuge, wie auch spezielle Ladesäulenkonzepte (z.B. Schnellladungen mittels Gleichstromladesäulen) sind Beispiele solcher Technologien. Bei einer zukünftig erhöhten Durchdringung dieser neuartigen Verbraucher und Einspeiser ist somit auch mit einer erhöhten Beeinflussung der Spannungsqualität des Stromnetzes zu rechnen.

Um die Spannungsqualität im deutschen und europäischen Stromnetz weiterhin auf einem hohen Niveau zu halten, muss sichergestellt werden, dass durch den Anschluss neuer Technologien Grenzwerte eingehalten und bestehende Geräte im elektrischen Netz in ihrem Betrieb nicht unzulässig beeinflusst werden. Des Weiteren müssen Geräte, die an das elektrische Netz angeschlossen werden, den typischen Störgrößen innerhalb zukünftiger Verteilungsnetze standhalten und auch unter evtl. Belastungs- und Fehlerfällen ordnungsgemäß funktionieren. Dies ist nur durch entsprechende Prüfverfahren zu gewährleisten.

Elektrische Ladesäulen unterliegen einer hohen Anzahl an Anforderungen auf Grund der Vielzahl an „Nutzern“. Netzbetreiber und auch Fahrzeughersteller erwarten keine unzulässige Beeinflussung ihrer netz- sowie fahrzeugseitigen Komponenten durch die Ladevorgänge. Wobei der Anwender der Ladesäule eine fehlerfreie, sichere sowie eine intuitiv bedienbare Funktionalität erwartet. Um die unterschiedlichen Anforderungen der Kunden erfüllen zu können, müssen Prüfverfahren und Standardisierungen, wie bspw. die sich im Entwicklungsstadium befindenden Norm IEC 61851, umgesetzt und weiterentwickelt werden. Daher werden im Testzentrum für Batteriespeicher und Smart Grid Technologien des Institutes für Hochspannungstechnik (IFHT) und des Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA) in Aachen umfangreiche Prüfverfahren für Ladeinfrastrukturkomponente entwickelt und die entsprechenden Prüfungen durchgeführt. Hierbei erfolgen die Prüfungen sowohl hinsichtlich elektrischer als auch nicht elektrischer Größen.

Das Testzentrum für Batteriespeicher und Smart Grid Technologien

Das Testzentrum bietet die Möglichkeit das Verhalten von verschiedensten Komponenten

ten der Verteilungsebene in einem realen Netzbetrieb im Normal- sowie Fehlerfall zu untersuchen. Dazu steht ein vollständiges und mit neuster Technologie ausgestattetes Verteilungsnetz zur Verfügung. Neben den Einsatzmöglichkeiten von fünf unterschiedlichen intelligenten Ortsnetzstationen (inkl. Stufenschaltern, steuerbaren Lastschaltern sowie neuster Mess- und Kommunikationstechnik) steht eine Lastbank mit bis zu 960 kW (3-phasig) bei einer Auflösung von 0,8 kW pro Phase zur Nachbildung symmetrischer wie auch unsymmetrischer Belastungen zur Verfügung.

Eine Besonderheit des Testzentrums stellt die Fähigkeit dar Fehlerfälle im laufenden Netzbetrieb zu erzeugen. Mittelspannungsseitige Fehler, wie Spannungseinbrüche (z.B. durch Kabelschäden bei Bauarbeiten), können mittels eines in die Mittelspannungs-Ringstruktur variabel integrierbaren LVRT¹-Containers erzeugt werden. Neben der Erzeugung mittelspannungsseitiger Spannungseinbrüche ist dieser Prüfcontainer in der Lage, die Ströme und Spannungen auf Mittelspannungsebene mittels eines Messfeldes und eines 16-Kanal-Transientenrekorders hochaufgelöst aufzuzeichnen und auszuwerten. Für Detailuntersuchungen auf der Niederspannungsebene steht zusätzlich neben dem realen Niederspannungsnetz ein Netzsimulator zur Verfügung (Abb. 1).



Abb. 1: Netzsimulator mit angeschlossenem Elektrofahrzeug

Dieser bietet die Möglichkeit zur variablen Nachbildung und Erzeugung nahezu beliebiger Strom-, Spannungs- und Frequenzverläufe in der Niederspannungsebene. Drei Verstärker für die jeweiligen Phasen mit zugehörigem Netzteil liefern bis zu 30 kW Dauerleistung (kurzzeitig 60 kW, Impulsleistungen > 250 kVA). Eine Rückspeiseeinheit stellt bei einer maximalen Dauerleistung von 127 kVA (dreiphasig) sicher, dass auch angeschlossene Einspeise- oder Energiewandlungstechnologien, wie z.B. PV-, KWK-Anlagen oder rückspeisefähige Elektrofahrzeuge, bei Einspeisung vermessen und geprüft werden können. In den Netzsimulator ist eine Prüfeinheit integriert, welche eine Vielzahl an Analysemethoden für z.B. Oberschwingungen, Flicker oder Frequenzschwankungen ermöglicht und durch ihre variable Programmierbarkeit ebenfalls die Möglichkeit der Erstellung neuer Prüfabläufe bietet. Innerhalb der Prüfungen lässt sich der Netzzinnenwiderstand variabel einstellen und somit können unterschiedlichste Netztypen nachgebildet werden.

Prüfverfahren für Ladesäulen

Basierend auf den unterschiedlichen Anforderungen der Ladesäulen Stakeholder Netzbetreiber, Endkunde und Fahrzeughersteller sowie dem aktuellen Stand der Normungsentwürfe (z.B. [1], [2]) im Bereich der Ladesäulen wurden Prüfparameter und dazugehörige Prüfverfahren identifiziert. Die im Testzentrum durchgeführten Untersuchungen an verschiedenste Ladesäulentypen (siehe auch Abb. 2) werden unter Beachtung der aktuellsten Netzanschlussregularien für die Niederspannungsebene erweitert.

¹ Low-Voltage Ride Through (Spannungseinbruch-Testsystem)



Abb. 2: AC Ladesäulen (Links) sowie DC-Schnellladesäule (Rechts)

Insgesamt stehen fünf AC Ladesäulen sowie eine DC-Schnellladesäule zur Verfügung, welche durch ihre interne Gleichrichterschaltung eine neuartige Verbrauchstechnologie darstellt. In Abb. 3 sind die unterschiedlichsten Anforderungen der Stakeholder an eine Ladesäule aufgelistet.

Für den Netzbetreiber, als Betreiber der Ladesäule, werden die Parameter der Netzintegration und der elektrischen Sicherheit fokussiert. Die elektrische Sicherheit wird für alle drei Ladesäulen-Stakeholder als wichtiger Parameter identifiziert. Vor der Durchführung aller Prüfungen wird daher die elektrische Sicherheit aller Ladesäulen nach [1] sowie [3] sichergestellt. Netzbetreiber sind weiterhin bestrebt, dass ihre Komponenten nicht unzulässig durch den Anschluss der Ladesäulen beeinflusst werden und dass diese wiederum eine Störfestigkeit gegenüber unterschiedlichen Netzzuständen und Fehlerfällen aufweisen. Daher werden die unterschiedlichen Ladesäulen bzgl. ihrer Störaussendung vermessen und verschiedensten Netzsituationen (z.B. Spannungsschwankungen, -unsymmetrien sowie -einbrüchen, Frequenzänderungen, Oberschwingungen, etc.) nach DIN-Normen sowie nach typspezifischen Verfahren ausgesetzt.

Alle Prüfaufbauten werden mit dem Netzsimulator realisiert. Dabei werden die AC-Ladesäulen mit einer ohmschen Last bei Bemessungsleistung belastet und getestet. Während aller Prüfungen werden die Messwerte sowohl fahrzeug- als auch netz-

seitig aufgezeichnet. Zur Einschaltung des Ladevorganges sowie der fahrzeugseitigen Messung wird eine Mess- und Kommunikationsemulator zwischen Ladesäule und ohmscher Last geschaltet, welche das Zuschalten der Last ermöglicht und gleichzeitig die fahrzeugseitige Kommunikation nachbilden kann. Eine einwandfreie Kommunikation zwischen Ladesäule und Fahrzeug kann somit durch Messung des Oszillatorsignales zwischen AC-Ladesäule und ohmscher Last während des Ladevorganges überprüft werden.

	Netzbetreiber <ul style="list-style-type: none"> • gute Netzintegration • hohe Störfestigkeit und geringe Störaussendungen • hohe Sicherheit
	Elektrofahrzeug <ul style="list-style-type: none"> • hohe Kompatibilität • funktionierende Kommunikation • hohe Sicherheit
	Endanwender <ul style="list-style-type: none"> • Gebrauchstauglichkeit • hohe Sicherheit

Abb. 3: Stakeholder und deren beispielhafte Anforderungen an Ladesäulen

Der Prüfparameter Gebrauchstauglichkeit beschreibt das Ausmaß, in dem ein Produkt in seinem Nutzungskontext durch den Anwender genutzt werden kann. Dabei sollen die Ziele des Benutzers effektiv, effizient und zufriedenstellend erreicht werden [4]. Für die Ladesäule bedeutet dies, dass der Benutzer, Endanwender oder Kunde sein Elektrofahrzeug einfach, schnell und komfortabel laden kann. Somit werden innerhalb des Prüfverfahrens auch nicht elektronische Eigenschaften der Ladesäule untersucht und bewertet. Beispielhaft seien hier folgende Punkte genannt:

- Unterstützung des Endanwenders durch Bedien- und Anzeigeelemente
- Anmeldung und Freischaltung der Ladung
- Bedienbarkeit vorhandener Klappen

- Einsteckvorgang und Verriegelungsmechanismen
- Verhalten im und nach Fehlerfall
- Auswirkungen von Fehlbedienungen

Prüf- und Messergebnisse

Bei der in diesem Artikel vorgestellten Ergebnisse der Prüfverfahren wird ein Hauptaugenmerk auf die Prüfungen der Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladesäule gelegt sowie die Netzintegration der DC-Ladesäulen.

Die Normbedingung für das Laden mit einem Typ 2 Stecker sind Frequenzen in einem Bereich von 1 kHz. In Abb. 4 sind beispielhaft die Messergebnisse des Pilotstromsignals bei einer Ladung mit fehlerfreier Kommunikation dargestellt.

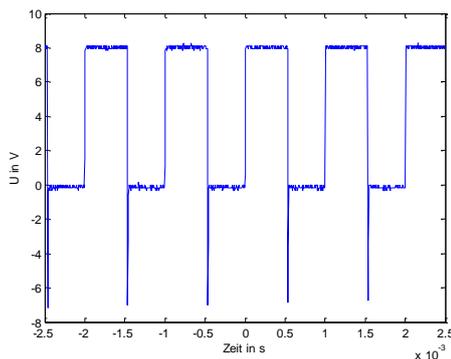


Abb. 4: Oszillatorsignal bei fehlerfreier Kommunikation

Nahezu alle Ladesäulen erreichen diesen Frequenzbereich und sind somit in der Lage den Ladevorgang erfolgreich durchzuführen. Bei einer Ladesäule wird während der Prüfungen ein Frequenzbereich um 0,3 Hz detektiert, wodurch beim Laden mit dem Steckertyp 2 keine Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladesäule möglich ist und somit auch kein Ladevorgang durchgeführt werden kann. Nachträgliche Untersuchungen konnten die Ansteuerung und einen Fehler in der mechanischen Verriegelung als Ursache ermitteln.

Der Ladevorgang an der DC Schnellladesäule lässt sich in zwei Bereiche einteilen. Einen ca. 30-minütigen Schnellladevorgang, in welchem die Batterie von 0 – 80 % geladen wird sowie einen ca. 2-stündigen Ladevorgang, in dem die restlichen 20 % des Fahrzeuges geladen werden. Nach der Schnellladung wird der Ladevorgang automatisch beendet. Im Folgenden wird beispielhaft die Vermessung eines kompletten Schnellladevorganges vorgestellt. Der Messpunkt ist während der Prüfungen zwischen Netzsimulator und Schnellladesäule. In Abb. 5 ist der netzseitige Verlauf der Wirk-, Blind- und Scheinleistung über den Schnellladevorgang abgebildet. Deutlich wird, dass nach Start des Ladevorganges die Wirkleistung sehr schnell auf Werte zwischen 47 und 49 kW und im Verlauf der nächsten drei Minuten auf knapp 50 kW ansteigt. Im weiteren Ladeverlauf sinkt die Wirkleistungsaufnahme der DC-Ladesäule bis auf ca. 10 kW ab.

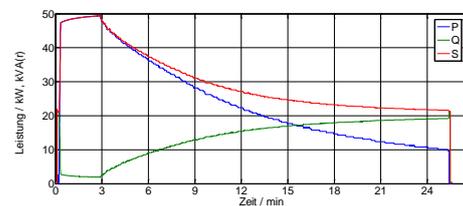


Abb. 5: Verlauf der Wirk-, Blind- und Scheinleistung während der Schnellladephase

Bemerkenswert ist der Anstieg des Blindleistungsbezuges ab dem Zeitpunkt, an dem die Wirkleistung sinkt. Am Ende des Ladevorganges ist der Anteil der Blindleistung größer als der der bezogenen Wirkleistung. Dies entspricht am Ende des Schnellladevorganges einem $\cos \varphi$ von 0,5 induktiv. Dieses Verhalten der Ladesäule wurde in allen gemessenen Ladevorgängen beobachtet. In den technischen Anschlussbedingungen für das Niederspannungsnetz werden Grenzwerte für den Verschiebungsfaktor $\cos \varphi$ in Bezug auf Entladungslam-

pen ($\cos \varphi$ zwischen $\pm 0,9$ induktiv/kapazitiv) und Lichtbogenschweißgeräte für den nicht professionellen Gebrauch ($\cos \varphi \geq 0,7$ induktiv) angegeben [5]. Bei den beiden Gerätetypen sind die Nutzungsdauern wesentlich geringer als die einer DC-Ladesäule. Wenn der Wert von $\cos \varphi = 0,7$ induktiv als unterster Grenzwert festgelegt wird, verletzt die Schnellladesäule die Netzanschlussbedingungen.

Ausblick

Derzeitig werden am Institut für Hochspannungstechnik internationale Netzsituationen ausgewertet um eine Weiterentwicklung der Testverfahren zu ermöglichen und ggf. die Auswirkungen länderspezifischer Netzsituationen auf das Verhalten der Ladefrastruktur und -geräte abbilden zu können. Genauso sollten zukünftige Netzsituationen, welche aus einem gesteigerten Anteil dezentraler Erzeuger in Niederspannungsnetzen resultieren können, in die Prüfverfahren eingebunden werden. – Zusätzlich sollten Ladekonzepte in die Prüfungsaufbauten integriert werden, welche sowohl durch eine Vehicle-To-Grid Fähigkeit oder die Steuerung des Ladeprozesses netzstabilisierende Systemdienstleistungen durch Elektrofahrzeuge ermöglichen.

Quellen

- [1] DIN IEC 61851 Konduktive Ladesysteme für E-Fahrzeug, Stand 2011.
- [2] DIN EN 61000-4 Elektromagnetische Verträglichkeit, Stand 2011.
- [3] DIN VDE 0100-600 Errichten von Niederspannungsschaltanlagen – Teil 6: Prüfungen, 2007.
- [4] EN ISO 9241-11 Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten, 1999.

- [5] VDN - Verband der Netzbetreiber Technische Anschlussbedingungen für den Anschluss an das Niederspannungsnetz, Juli 2007.
- [6] VDE-AR-E 2623-2-2 Anwendungsregel - Stecker, Steckdosen, Fahrzeugsteckvorrichtungen und Fahrzeugstecker – Ladung von Elektrofahrzeugen, 2010.

Kontakt

Dr.-Ing. Andreas Kurz
kurz@ifht.rwth-aachen.de
+49 (241) 80-49300

Dipl.-Ing. Michael Peitz
peitz@ifht.rwth-aachen.de
+49 (241) 80-49331

Hochspannungstechnische Gesellschaft (HTG) an der RWTH Aachen e.V.

Im Zentrum des Vereinslebens der HTG stand im vergangenen Jahr das Ehemaligentreffen am Institut für Hochspannungstechnik und die darin integrierte Mitgliederversammlung vom 27./28. Mai 2011.

Zum Ehemaligentreffen, das diesmal im Zeichen des 10-jährigen Dienstjubiläums von Prof. Armin Schnettler stand, sind etwa 80 Besucher aus dem Kreis der Ehemaligen angereist, um sich über das aktuelle Geschehen am Institut zu informieren und alte Kontakte zu pflegen.

Am Vormittag des 27. Mai gaben Prof. Schnettler und die Abteilungsleiter der drei Forschungsbereiche Isoliersysteme und Diagnostik, Netztechnik und Nachhaltige Energiesysteme interessante Einblicke in die aktuellen Aktivitäten am IFHT. Anhand der Vorträge konnte sich das Auditorium von der enormen Bandbreite des Forschungsspektrums überzeugen, welche mit ebenso beeindruckenden Zahlen zur Entwicklung des Instituts untermauert werden konnte.

Nach einer Institutsführung am Nachmittag wurde die Abendveranstaltung in der Erholungs-gesellschaft eingeläutet. Wie bereits 2009 bot diese viel Gelegenheit, sich mit ehemaligen und derzeitigen Institutsmitgliedern auszutauschen. Darüber hinaus gab es tänzerische (Rock'n Roll-Gruppe) und musikalische (IFHT-Band) Einlagen, so dass der Abend sicherlich einen gelungenen Ausklang des ersten Veranstaltungstages darstellte. Die gesamte Veranstaltung endete dann am darauf folgenden Tag mit einem Frühstück und einer Führung im Ludwig-Forum an der Jülicher Straße.

Während der genannten Institutsführung wurde die Gelegenheit genutzt, die jährliche Mitgliederversammlung des Vereins durchzuführen. Im Rahmen der turnusgemäßen Vorstandswahlen wurden Dr. Philipp Walter und Dr. Christian Cornelissen in ihrem Amt bestätigt. Prof. Schnettler ist als Leiter des Instituts kraft seines Amtes Mitglied des Vorstands. Im Anschluss an die formalen Themen blieb genug Zeit, um sich über die Aktivitäten des Vereins auszutauschen und neue Ideen und Vorschläge zu diskutieren.

Die Aktivitäten des Ehemaligenvereins im vergangenen Jahr umfassten ferner u.a. folgende Schwerpunkte:

- Bezüglich der finanziellen Unterstützung des wissenschaftlichen Nachwuchses sind weitere Zuschüsse ausgezahlt worden, sowohl für Peer-Review-Veröffentlichungen als auch für Patentanmeldungen.
- Zudem sind verschiedene Veranstaltungen des IFHT, die die Sichtbarkeit des Instituts bei den Studierenden erhöhen, mit kleineren Beträgen bezuschusst worden.
- Bezüglich der webbasierten Vereinsdatenbank mit integrierter Job- und Praktikums-börse sind die Funktionalitäten nunmehr vollständig vorhanden, die Einführung im Kreis der Studierenden ist jedoch noch im Gange.

Abschließend möchten wir interessierte ehemalige Wissenschaftliche Angestellte auf die diesjährige Mitgliederversammlung der HTG aufmerksam machen, welche am 15.06.2012 in den Räumen des IFHT statt-

finden wird. Bei dieser Gelegenheit ist ein unverbindliches Kennenlernen des Vereins problemlos möglich und vielleicht ergibt sich das eine oder andere interessante Gespräch im Rahmen der Versammlung oder im Anschluss beim „gemütlichen Beisammensein“ am Abend.

Kontakt:

Dr. Christian Cornelissen
Dr. Philipp Walter
mail@htg-aachen.de
www.htg-aachen.de



Abb.1: IFHT-Band während der Abendveranstaltung



Abb. 2: Kolloquium



Abb. 3: Voller Saal während der Abendveranstaltung

Preise und Auszeichnungen

Auch dieses Jahr fand erfreulicherweise wieder eine Vielzahl von Preisverleihungen an Mitarbeiter des IFHT statt. Ausgezeichnet wurden diese für exzellente Studienleistungen und hervorragende Abschlussarbeiten im Bereich der Energietechnik.

Springorum-Denkmünze

(17. Juni 2011)

Jährlich erhalten die besten Absolventinnen und Absolventen der RWTH Aachen für ihre exzellenten Examensleistungen Auszeichnungen.

Die Gesellschaft der Freunde und Förderer der RWTH Aachen e. V. vergibt für die Diplomanden, Magister und Master eines Jahrgangs, die ihr Examen mit Auszeichnung bestehen, die Springorum-Denkmünze.

Auch in diesem Jahr luden die Freunde und Förderer der RWTH Aachen e.V. diejenigen Absolventinnen und Absolventen der RWTH ein, die im Jahr 2010/2011 mit einem herausragenden Examen ihr Studium abgeschlossen haben. Die alljährlich stattfindende Festveranstaltung von proRWTH fand im Audimax der RWTH Aachen statt.

Insgesamt 127 Studierende erhielten in diesem Jahr die Auszeichnung der Springorum Denkmünze, darunter auch Herr Dipl.-Ing. Thomas Helmschrott und Herr Dipl.-Ing. Daniel Eichhoff.



Abb. 1: Rektor Prof. E. Schmachtenberg, D. Eichhoff, Dr. G. Voswinckel



Abb. 2: Rektor Prof. E. Schmachtenberg, T. Helmschrott, Dr. G. Voswinckel

RWE Zukunftspreis

(11. Oktober 2011)

Dipl.-Ing. Hendrik Natemeyer wurde für seine Diplomarbeit mit dem Titel "Szenarioanalyse zur ganzheitlichen Bewertung zukünftiger Ausbaumaßnahmen im europäischen Übertragungsnetz" mit dem 2. Platz beim RWE Zukunftspreis 2011 ausgezeichnet.



Abb. 3: Dr. Hans-Dieter Rüter, Hendrik Natemeyer, Ingo Alphéus

Der zum zweiten Mal vergebene Preis zeichnet herausragende wissenschaftliche Arbeiten von Absolventen ingenieurwissenschaftlicher, betriebswirtschaftlicher

und naturwissenschaftlicher Studiengänge zum Thema "Impulse für die Energiewelt von morgen" aus. Die Verleihung des Preises erfolgte am 11. Oktober 2011 in der Philharmonie Essen.

DEIS Student Graduate Fellowships

(16. Oktober 2011)

Die Stipendien, die von der "IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society" gegründet wurden, werden für eine Graduiertenausbildung in den Bereichen der elektrischen Isolation und dielektrische Phänomene vergeben, die von Interesse für die Gesellschaft sind. Sie sind offen für geeignete Kandidaten aus der ganzen Welt. Der Preis wurde im Oktober 2011 auf der IEEE DEIS-Konferenz in Cancun (Mexiko) verliehen an Dipl.-Ing. Anja Strauchs.

Otto-Junker-Preis

(9. November 2011)

1970 wurde die Otto-Junker-Stiftung von Dr.-Ing. E.h. Otto Junker als Auffangstiftung für den Erbfall ins Leben gerufen.

Mit der Errichtung dieser Stiftung verfolgte er vor allem zwei Ziele: Zum einen wollte er die Kontinuität und den Fortbestand seines Unternehmens sichern; gleichzeitig wollte er aber auch mit den Erträgen seiner Firma die Wissenschaft und Forschung, deren wachsende Bedeutung Otto Junker schon frühzeitig erkannt hatte, nachhaltig fördern.

Als Dr.-Ing. E.h. Otto Junker 1982 kinderlos verstarb, erbte die Stiftung als seine Universalerbin nicht nur ein beträchtliches Barvermögen, sondern auch die 100%ige Beteiligung an dem Unternehmen Otto Junker.

Einzigste Destinatärin der Otto-Junker-Stiftung ist die RWTH Aachen, der sich der Stifter zeitlebens sehr verbunden ge-

fühlt hat. Seit Beginn der Fördertätigkeit Mitte der 80er Jahre hat die Stiftung der Aachener Hochschule mehr als 15 Mio. Euro für mehr als 100 Forschungsvorhaben zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus hat sich die Stiftung, entsprechend ihrem Satzungsauftrag, der Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses in besonderem Maße angenommen. Es werden jährlich durchschnittlich 10.000 Euro für Stipendien vergeben. Die Otto-Junker-Stiftung zählt damit heute zu den größten Förderern der RWTH Aachen.

Einen herausragenden Stellenwert hat auch die jährliche Verleihung der Otto Junker Preise, die weit über die Region der Hochschule hinaus Geltung gewonnen hat. Mit dem Preis würdigt die Otto-Junker-Stiftung hervorragende Studienleistungen und Studienabschlüsse von Absolventen der RWTH Aachen.

Unter den 4 Preisträgern waren in diesem Jahr gleich 2 Mitarbeiter des IFHT vertreten: Herr Dipl.-Ing. Thomas Helmschrott und Herr Dipl.-Ing. Daniel Eichhoff.



Abb. 4: Daniel Eichhoff, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Armin Schnettler, Thomas Helmschrott

Friedrich-Wilhelm-Preis

(25. November 2011)

In diesem Jahr ehrte die RWTH Aachen 28 Studierende, Doktoranden sowie Habilitanden mit dem Friedrich-Wilhelm-Preis 2011. Die Auszeichnung wird alljährlich an Studierende und Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler der RWTH vergeben, die aufgrund ihrer herausragenden Leistungen ausgewählt worden sind. Die Verleihung der Preise fand im Rahmen einer Feierstunde in der Hochschule statt. Unter den Preisträgern befindet sich auch Herr Dipl.-Wirt.-Ing. Bartholomäus Wasowicz, der den Preis für seine Diplomarbeit zum Thema „Entwicklung einer integrierten handelsbasierten Einsatz- und Ausbauplanung des deutschen Kraftwerksparks unter ökologischen Kriterien“ als herausragende wissenschaftlich Leistung im Bereich der Energiewirtschaft und Energietechnik erhielt.



Abb. 5: Verleihung der Friedrich-Wilhelm-Preise in der Aula 1

Trianel-Preis

(9. Dezember 2011)

Auch am diesjährigen Tag der Elektrotechnik und Informationstechnik zeichnete Trianel wieder einen herausragenden Abschluss im Bereich der Energietechnik aus mit dem Trianel-Preis aus. Der Preis ging dieses Mal an Herrn Dipl.-Wirt.-Ing. Simon Hendrik Koopmann. Herr Koopmann hat seine Diplomarbeit am IFHT zum

Thema „Ganzheitliche Bewertung der Integration von Speichersystemen in Verteilungsnetzen mit hoher Durchdringung erneuerbarer Energien“ geschrieben und tritt ab März 2012 eine Stelle als wissenschaftlicher Mitarbeiter des IFHT an.

STAWAG-Preis

(9. Dezember 2011)

Überreicht von STAWAG-Vorstand Dr. Christian Becker erhielt dieses Jahr auf dem Tag der Elektrotechnik und Informationstechnik Herr Dipl.-Ing. Hendrik Natemeyer den STAWAG-Preis für einen herausragenden Studienabschluss im Bereich der Energietechnik.



Abb. 5: Dr. Christian Becker, Preisträger Hendrik Natemeyer

Kontakt

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