

**Adresse:**

Technische Universität Chemnitz  
 Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
 Professur Energie- und Hochspannungstechnik  
 D-09107 Chemnitz

**Dienstszitz:**

Reichenhainer Str. 70  
 A.-F.-Weinholdbau, Raum w317  
 D-09126 Chemnitz  
 Tel.: +49 371 531 33343  
 Fax: +49 371 531 24239

**Homepage:**

<http://www.tu-chemnitz.de/etit/eneho/>

**Anfahrt:**

<https://www.tu-chemnitz.de/etit/eneho/kontakt/anfahrt.html> oder Anfahrtsskizze im hinteren Einband

**Telefon, Fax, E-mail:**

Name:	Telefon:	Fax:	E-mail:
Prof. W. Schufft	+49 371 531 33343	+49 371 531 833343	wolfgang.schufft@etit.tu-chemnitz.de
Prof. D. Amft	+49 371 531 33341	+49 371 531 833341	dietrich.amft@etit.tu-chemnitz.de
Sekret.: A. Voit	+49 371 531 33142	+49 371 531 833142	antje.voit@etit.tu-chemnitz.de
A. Gürlek	+49 371 531 39859	+49 371 531 839859	akif.guerlek@etit.tu-chemnitz.de
A. Hoshmeh	+49 371 531 38717	+49 371 531 838717	abdullah.hoshmeh@etit.tu-chemnitz.de
D. Kühnert	+49 371 531 39939	+49 371 531 839939	david.kuehnert@etit.tu-chemnitz.de
K. Jacob	+49 371 531 31434	+49 371 531 833095	kai.jacob@etit.tu-chemnitz.de
L. Jacob	+49 371 531 31434	+49 371 531 831434	liana-maria.jacob@etit.tu-chemnitz.de
B. Jacobsen	+49 371 531 30084	+49 371 531 830084	benjamin.jacobsen@etit.tu-chemnitz.de
J. Lippold	+49 371 531 33341	+49 371 531 833341	juergen.lippold@etit.tu-chemnitz.de
F. Safargholi	+49 371 531 31926	+49 371 531 831926	farhad.safargholi@etit.tu-chemnitz.de
M. Stark	+49 371 531 33364	+49 371 531 833364	michael.stark@etit.tu-chemnitz.de
Dr. J. Teuscher	+49 371 531 37752	+49 371 531 837752	jens.teuscher@etit.tu-chemnitz.de

**Redaktion:** Liana Jacob; Benjamin Jacobsen

**Titelfoto:** Unser Smart für umweltfreundliche Dienstfahrten

# 1 Vorwort

Sehr geehrte Freunde und Partner,

am Ende des Jahres 2018 wollen wir in unserem Jahresbericht wieder in bewährter Weise berichten, dabei selbst resümieren, was wir geleistet haben und was uns bewegt hat.

Aus energiepolitischer Sicht war 2018 wohl ein verrücktes Jahr. Im Hambacher Forst kämpfen militante Öko-Aktivist\*innen mit Zwillen und Barrikaden gegen den Klimawandel. Gleichzeitig hat uns dieser Klimawandel im sonnenreichen Jahr 2018 die 40%-Marke an Regenerativen erreichen lassen. Die letzte Steinkohlezeche wurde zum Ende des Jahres im Ruhrgebiet geschlossen. Mit dem voraussehbaren Braunkohleausstieg wird Deutschland bis zur Schließung der fossilen Lücke bei der Elektroenergiebereitstellung vollständig auf den Import fossiler Energieträger angewiesen sein - Gas aus Russland, Öl aus Saudi-Arabien und Steinkohle aus Kolumbien. Auch das Energiekonzept der Stadt Chemnitz setzt nach der Schließung des bestehenden Braunkohlekraftwerkes ab 2026 auf Gas, welches hoffentlich aus der bislang umstrittenen North Stream 2 Pipeline kommen wird.



Während unserer Exkursion ins Leipziger Braunkohlerevier haben wir uns ein Bild von der großflächigen Naturzerstörung durch den Braunkohletagebau machen können, siehe auch Einzelbericht. Wir sind aber auch durch eine rekultivierte Seenlandschaft geradelt, welche die vorausgegangene Naturzerstörung wenigstens teilweise vergessen macht.

In Lehre und Forschung sind wir einigermaßen in Kontinuität. Leider waren unsere Drittmittelaktivitäten nicht ganz so erfolgreich wie in den Vorjahren - Fortuna war uns wohl etwas ungnädig - was sich auch an unserem Personalbestand bemerkbar macht. Dafür können wir uns nicht über das kontinuierliche Interesse der Studenten an der elektrischen Energietechnik beklagen, was uns wieder eine Vielzahl studentischer Arbeiten, insbesondere Bachelor- und Masterarbeiten beschert hat.

Im vergangenen Jahr wurde die Förderung der ESF-Nachwuchsforscherguppe *ECoMobility*, in der wir mit Björn Born vertreten waren, erfolgreich und öffentlichkeitswirksam abgeschlossen, siehe auch Einzelbericht. Bei dieser Gelegenheit haben wir einen der vier Elektro-Smart „geerbt“, der uns an der Professur nun zur Nutzung zur Verfügung steht. Auf dem Titelbild sehen Sie Frau Kramer während einer Dienstreise zur Universitätszentrale.

Im letzten Jahr sind Dr. Kaveh Malekian-Bourojeni, Suleiman Hadid und Björn Born aus der Professur ausgeschieden. Wir wünschen ihnen Glück und Erfolg auf ihrem weiteren Lebensweg. Dafür verstärken nun Ben-

jamin Jacobsen und David Kühnert unsere Reihen. Frau Franziska Kramer hat uns nach der Sekretariatsvertretung wieder verlassen. Wir danken ihr für ihre freundliche und couragierte Art und wünschen auch ihr alles Gute.

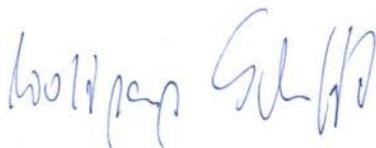
Im letzten Jahr berichtete ich voller Hoffnung über einen Rektoratsbeschluss zur Einführung modularisierter Diplomstudiengänge. Leider hat es die Fakultät nicht geschafft, die Voraussetzungen dafür zu schaffen, dass auch an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik ein neuer Diplomstudiengang zum Wintersemester 2019 starten kann. Damit verschiebt sich die Rückkehr zum Diplom - nach meinem Verständnis Elektrotechnik „von der Pike auf“ - frühestens auf das Wintersemester 2020. Leider haben die Studenten in den Masterstudiengängen derzeit unterschiedliche fachliche Voraussetzungen, da sie Bachelorabschlüsse von ausländischen Hochschulen oder von Fachhochschulen haben oder gar Quereinsteiger sind. Wünschenswert wären mehr Studienanfänger in Diplomstudiengängen, natürlich auch gern aus dem Ausland.

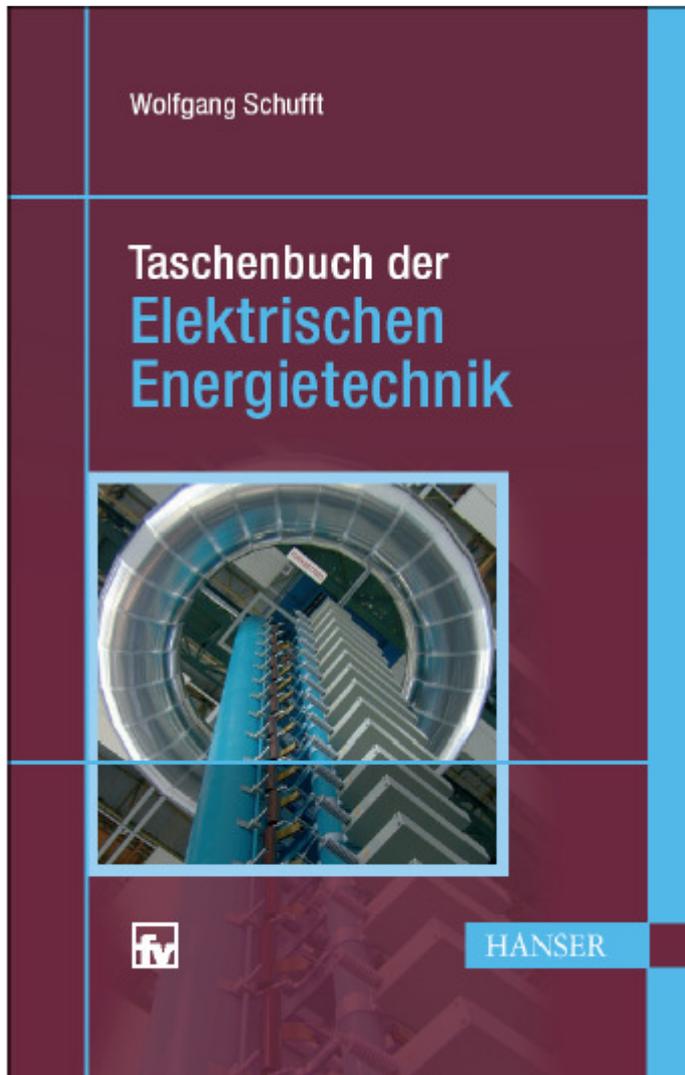
Aus aktuellem Anlass möchte ich Sie herzlich nach Chemnitz einladen. Chemnitz ist eine liebenswerte Stadt mit rechtschaffenden Menschen, einer beeindruckenden Industriegeschichte und bedeutenden Kunstsammlungen. Bitte überzeugen Sie sich selbst.

Wir sehen optimistisch in das kommende Jahr 2019, wünschen auch Ihnen viel Glück, Erfolg und gute Laune und freuen uns auf eine weitere, gedeihliche Zusammenarbeit.

Chemnitz im Dezember 2018

Ihr





Inhalt:

1. Energiebegriff, allgemeine Grundlagen (W. Schufft)
2. Elektroenergiebereitstellung (U. Rindelhardt, T. Sander, J. Zschernig)
3. Betriebsmittel in Elektroenergienetzen (T. Hiller)
4. Planungsaspekte für elektrische Netze und Anlagen (J. Backes, H. Bauer, P. Schegner)
5. Beanspruchungen von Betriebsmitteln (W. Schufft, S. Großmann, H. Löbl)
6. Hochspannungstechnik (W. Schufft)
7. Schaltgerätetechnik (F. Berger)
8. Elektrische Maschinen und Antriebe (W. Hofmann)
9. Leistungselektronik (W. Hofmann)
10. Elektroenergieanlagensicherheit (K.-H. Freytag, P. Schegner)
11. Elektroenergiewirtschaft (N. Menke)

## Inhalt

1	Vorwort .....	2
2	Personelle Besetzung .....	6
3	Lehre .....	8
3.1	Studienablaufpläne .....	8
3.2	Beschreibung der Lehrfächer der Professur .....	9
4	Forschung .....	11
4.1	Schwerpunkte .....	11
4.2	Aktuelle Promotionsvorhaben .....	13
5	Abgeschlossene wissenschaftliche Arbeiten .....	34
5.1	Masterarbeiten .....	34
5.2	Bachelorarbeiten .....	35
6	Veröffentlichungen und Konferenzbeiträge .....	36
7	Externe Aktivitäten und Kontakte .....	38
7.1	Teilnahmen an Konferenzen, Tagungen, Kolloquien .....	38
7.2	Gäste an der Professur .....	40
8	Höhepunkte .....	41
8.1	Lange Nacht der Wissenschaften am 05.05.2018 .....	41
8.2	Start des Projektes UNDYNE am 01.06.2018 .....	42
8.3	Fachexkursion der Professur in den Bergbau-Technikpark Großpösna am 15.06.2018 .....	43
8.4	Promotionsverteidigung Dr. Abdullah Hoshmeh 23.07.2018 .....	44
8.5	Erfolgreicher Abschluss des ESF-geförderten Projektes EcoMobility am 31.08.2018 .....	45
8.6	Erfolgreicher Abschluss des Projektes NetzHarmonie am 11. und 12.09.2018 .....	46
8.7	Weihnachtsfeier am 6. Dezember 2018 .....	47
9	Ausstattung für Praktika und Prüfungen in der Hochspannungstechnik .....	48
10	Laboraausstattung .....	51
11	Dienstleistungsangebote .....	55
11.1	Dielektrische Prüfungen .....	55
11.2	Diagnosemöglichkeiten .....	55
11.3	Prüfung der Stromtragfähigkeit .....	55
11.4	Spezielle Messaufgaben .....	56
11.5	Virtueller Stoßspannungsgenerator .....	56
11.6	Netzanalysen .....	56
12	Referenzen .....	57

## 2 Personelle Besetzung



Prof. em. Dr.-Ing. habil.  
Dietrich Amft - Emeritus



Dipl.-Ing. Björn Born  
bis 06/18



Dipl.-Ing. Akif Gürlek  
Doktorand



M.Sc. Suleiman Hadid  
Doktorand bis 05/18



Dr.-Ing. Abdullah Hoshmeh  
Mitarbeiter



Dipl.-Ing. David Kühnert  
Doktorand seit 07/18



M.Sc. Kai Jacob  
Doktorand



M.Sc. Liana Jacob  
Doktorandin



M.Sc. Benjamin Jacobsen  
Doktorand seit 08/18



Jürgen Lippold  
Technischer Angestellter



Franziska Kramer  
Sekretariat bis 10/18



Dr.-Ing. Kaveh Malekian-Boroujeni  
Mitarbeiter bis 02/18



Prof. Dr.-Ing. Norbert Menke  
Lehrbeauftragter



Dr. rer. nat. Ralf Pietsch  
Lehrbeauftragter



M.Sc. Farhad Safargholi  
Doktorand



Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schufft  
Leiter der Professur



Michael Stark  
Technischer Angestellter



Dr.-Ing. Jens Teuscher  
Mitarbeiter



B.A. Antje Voit  
Sekretariat

## 3 Lehre

### 3.1 Studienablaufpläne

Lehrfach	Lehrverantwortlicher	Bachelor Elektrotechnik				Master Energie- u. Automatisierungssysteme	
		3. Sem.	4. Sem.	5. Sem.	6. Sem.	7. Sem.	8. Sem.
<b>Basismodule:</b>							
Elektrische Energietechnik/Nachhaltige Elektroenergieerzeugung	Schufft	2 1 0*					
Hochspannungstechnik	Schufft			3 1 2			
Elektroenergieübertragung u. -verteilung	Schufft				3 1 2		
<b>Vertiefungsmodule:</b>							
Netze und Betriebsmittel	Schufft				2 1 0		
Beanspruchung von Betriebsmitteln	Schufft					3 1 1	
Statistik und Isolationskoordination	Schufft						2 1 0
<b>Ergänzungsmodule:</b>							
Elektroenergiewirtschaft	Menke					1 0 0	
Netzberechnung und Schutztechnik	Teuscher						2 1 0
Diagnose- und Messtechnik	Pietsch						2 0 0

\* 2 1 0 bedeutet: 2 SWS (Semesterwochenstunden zu 45 min) Vorlesung, 1 SWS Übung, 0 SWS Praktikum. Wahlfächer werden für ein bestimmtes Semester empfohlen, z.B. im 8. Semester, auch eine frühere Belegung (in Klammern), z.B. im 6. Semester, ist möglich.

### 3.2 Beschreibung der Lehrfächer der Professur

#### Elektrische Energietechnik/ Nachhaltige Elektroenergieerzeugung

Basismodul im Bachelor-Studiengang Elektrotechnik, 3. Semester

Umfang: 15 Vorlesungen / 7 Übungen

##### **Prof. Schufft**

Inhalt: Energiebegriff, Überblick über das Elektroenergieversorgungssystem, Elektroenergieerzeugung in Wärmekraftwerken, Nutzung von Solarenergie, Elektroenergieerzeugung in Wasserkraftwerken, Elektroenergieerzeugung durch Windenergieanlagen, Elektroenergieerzeugung aus Bioenergie

#### Hochspannungstechnik

Basismodul im Bachelor-Studiengang Elektrotechnik, 5. Semester

Umfang: 23 Vorlesungen / 7 Übungen / 7 Praktikumsversuche

##### **Prof. Schufft**

Inhalt: Beanspruchungen von Isolierungen, Erzeugung hoher Spannungen, Klassifizierung und Berechnung des elektrischen Feldes, Entladungsphysik von Gasen, flüssigen und festen Isolierstoffen

#### Elektroenergieübertragung und -verteilung

Basismodul im Bachelor-Studiengang Elektrotechnik, 6. Semester

Umfang: 23 Vorlesungen / 7 Übungen / 7 Praktikumsversuche

##### **Prof. Schufft**

Inhalt: Aufbau, Struktur und Komponenten des Elektroenergiesystems, wichtige Berechnungsgrundlagen (wie symmetrische Komponenten) und deren Anwendung auf ausgewählte Elemente des Elektroenergiesystems

#### Netze und Betriebsmittel

Vertiefungsmodul im Bachelor-Studiengang Elektrotechnik, 6. Semester

Umfang: 15 Vorlesungen / 7 Übungen

##### **Prof. Schufft**

Inhalt: Aufbau des Elektroenergienetzes, Spannungsebenen und Netzformen, Netztopologie, Systematisierung der Betriebsmittel, Aufbau und stationäres Verhalten von Betriebsmitteln, wie Leitungen, Transformatoren, Kompensationsanlagen

#### Beanspruchung von Betriebsmitteln

Vertiefungsmodul im Master-Studiengang Energie- und Automatisierungssysteme, 1. Semester

Umfang: 23 Vorlesungen / 7 Übung / 3 Praktikumsversuche

##### **Prof. Schufft**

Inhalt: Klassifizierung und Beschreibung der Beanspruchungen von Betriebsmitteln durch innere und äußere Überspannungen, Wanderwellen, Lichtbögen und Kurzschlussströme, Wärmeberechnungen, Auslegungsprinzipien von Betriebsmitteln, insbesondere von Schaltern

**Statistik und Isolationskoordination**

Vertiefungsmodul im Master-Studiengang Energie- und Automatisierungssysteme, 2. Semester

Umfang: 15 Vorlesungen / 7 Übungen

**Prof. Schufft**

Inhalt: Statistische Verteilungsfunktionen und deren Anwendung zur Beschreibung des Isoliervermögens und von elektrischen Beanspruchungen, Planung von Hochspannungsprüfungen und Testverfahren zum Nachweis der Unabhängigkeit von Messreihen, Grundzüge der Isolationskoordination, Grundbegriffe der Zuverlässigkeit einschließlich deren Berechnung

**Elektroenergiewirtschaft**

Ergänzungsmodul im Master-Studiengang Energie- und Automatisierungssysteme, 1. Semester

Umfang: 7 Vorlesungen

**Prof. Menke**

Inhalt: Grundlagen der Energiewirtschaft, Kosten der Energieversorgung, Investitionsrechnung, Energiepreisbildung, Belastungskurven, Kraftwerkeinsatz und Lastverteilung, wirtschaftlicher Verbundbetrieb, Betriebsmittelauslastung, Least-Cost-Planning, Durchleitung, Marketing und neue wirtschaftliche Aspekte

**Netzberechnung und Schutztechnik**

Ergänzungsmodul im Master-Studiengang Energie- und Automatisierungssysteme, 2. Semester

Umfang: 15 Vorlesungen / 7 Übungen

**Dr. Teuscher**

Inhalt: Netztopologie, Leistungsflussberechnungen in Strahlen-, Ring- und Maschennetz, Methoden zur Kurzschlussberechnung (symmetrisch und unsymmetrisch), Schutzmaßnahmen im Niederspannungsnetz, Schutz im Mittelspannungsnetz, Schutzkriterien und Sensoren

**Diagnose- und Messtechnik**

Ergänzungsmodul im Master-Studiengang Energie- und Automatisierungssysteme, 2. Semester

Umfang: 15 Vorlesungen

**Dr. Pietsch**

Inhalt: Aspekte der Instandhaltung und Qualitätssicherung, Messung des Scheitelwertes der Spannung, Transienten-Messsysteme, nichtkonventionelle Messwandler, Teilentladungs- und Verlustfaktor-Messtechnik, Diagnose und Messtechnik für Kabel, gasisolierte Schaltanlagen (GIS) und Transformatoren

## 4 Forschung

### 4.1 Schwerpunkte

Die Schwerpunkte in der Forschung orientieren sich an den Anforderungen der Übertragungs- und Verteilnetz-Betreiber sowie der Industrie des deutschen und internationalen Marktes. Entwicklungen mit hohem wissenschaftlichem Potential sind dabei auf dem Gebiet der Einbindung leistungsstarker Off-Shore-Windparks und Integration dezentraler Erzeuger zu verzeichnen. Als Folge des zunehmenden Kostendrucks auf die Netzbetreiber, verursacht durch die Regulierung des Energiemarktes, werden verbesserte Verfahren zur Entwicklung effizienter Instandhaltungs- und Erneuerungsstrategien sowie an diese Regularien angepasste Hilfsmittel notwendig. Die Integrationsmöglichkeiten von Speichersystemen für Elektroenergie zum Gelingen der Energiewende haben an Bedeutung gewonnen und weisen hohe Entwicklungspotentiale auf. In der folgenden Grafik sind die Forschungsschwerpunkte mit den entsprechenden Arbeitsgebieten der Professur aufgezeigt, welche ebenso die thematische Überschneidung von Forschungsinhalten wiedergibt. Nachfolgend werden die einzelnen Arbeitsgebiete näher beschrieben.



Abbildung 1: Forschungsschwerpunkte und Arbeitsgebiete der Professur

**Netzintegration der Elektromobilität**

- Auswirkungen der Elektromobilität auf das zukünftige Elektroenergiesystem
- Konzepte für multimodale Mikromobilität unter Nutzung lokaler regenerativer Energien (Nachwuchsforscherguppen fahrE und ECoMobility)

**Modellierung zukünftiger Niederspannungsnetze:**

- Simulation und Optimierung von Leistungsflüssen
- Belastung zukünftiger Niederspannungsnetze unter Beachtung von Verbraucher- und Erzeugerstrukturen

**Speichersysteme für eine nachhaltige Energieversorgung**

- Intelligente dezentrale Energiespeichersysteme (Nachwuchsforscherguppe IDE)
- Konzepte zur Speicherung von Elektroenergie im Megawatt-Bereich

**Probabilistische Netzplanung:**

- Probabilistische Untersuchung zur Bewertung der Lastsituation unter Einbeziehung dezentraler Erzeugungseinheiten
- Untersuchung der Einspeisecharakteristik von Photovoltaik und Windenergie in der Mittelspannungsebene
- Energieeffiziente Netzauslastung (Nachwuchsforscherguppe „SyNErgIT“)

**Netzanbindung leistungsstarker regenerativer Erzeugungsanlagen**

- Einfluss großer Wind- und PV-Parks auf die Übertragungs- und Verteilungsnetze
- Implementierung leistungsstarker HVDC-Systeme
- Entwicklung geeigneter Modelle von Windenergieanlagen zur Beschreibung des Systemverhaltens

**Zustandsbewertung und Asset-Management**

- Lebensdaueranalysen von Anlagegütern in Bezug auf den Gesamtanlagenbestand
- Untersuchung der Auswirkungen auf die Restlebensdauer von Mittelspannungs-Massekabeln durch Masseverarmung in Gefällestrecken
- Optimierung von Instandhaltungsstrategien
- Labor-Untersuchungen an Mittelspannungskabeln und -garnituren und Isoliersystemen
- Mess-, Diagnose- und Prüfverfahren (Teilentladung, Verlustfaktor, Stufentests, Dauerversuch, ...)
- Modellierung von Betriebsmitteln
- Vor-Ort-Untersuchungen mit einem mobilen Diagnose- und Messsystem

**Ausgleichsvorgänge im Elektroenergiesystem**

- Transiente Ausgleichsvorgänge auf langen Kabelstrecken in der HS- und HöS-Spannungsebene
- Berechnung von Überspannungen bei Schalt- und Fehlervorgängen im Mittelspannungs- und Hochspannungsnetz

**Isolationskoordination**

- Isolationskoordination in ausgedehnten Industrieanlagen und Netzen
- Untersuchungen zur Ausbreitung von Blitzströmen im Hoch- und Höchstspannungsnetz unter Berücksichtigung der frequenzabhängigen Parameter von Betriebsmitteln

**Oberschwingungsverhalten regenerativer Erzeugungsanlagen**

- Überlagerung verschiedener Erzeugungseinheiten (Verbundprojekt Netzharmonie)
- Modellierung frequenzabhängiger Parameter der Netzkomponenten
- Optimierung der Umrichter-Modulationstechnik zur Verbesserung des Oberschwingungsverhaltens am Netz

## 4.2 Aktuelle Promotionsvorhaben

In der folgenden Übersicht sind die Arbeitsthemen der aktuellen Promotionsvorhaben genannt. Einen Eindruck über diese Themen und deren Bearbeitungsfortschritt sollen die darauffolgenden Beiträge vermitteln.

- Aldiab, A.\*:** Optimierter Betrieb von STATCOMs zur Verbesserung der Elektroenergiequalität unter besonderer Berücksichtigung von Oberschwingungen
- Dietrich, A.\*:** Analyse von Betriebsdaten großer Photovoltaik (PV)-Kraftwerke in Europa zur Verifizierung von Berechnungsmodellen in Simulationsprogrammen
- Gürlek, A.:** Zum Entladungsverhalten der Spitze-Spitze-Elektrodenanordnung großer Elektrodenabstände bei Blitzspannung
- Hadid, S.:** Untersuchung der Einflussfaktoren auf den frequenzabhängigen Verlustfaktor an VPE-isolierten Mittelspannungskabeln
- Jacob, K.:** Klassifizierung des Zustandes von Mittelspannungskabelmuffen anhand des Teilentladungsverhaltens
- Jacob, L.:** Erweiterte Optimal Power Flow - Berechnung der Leistungsflüsse bei erzeuger- und verbraucherseitigen Flexibilitätspotenzialen
- Jacobsen, B.:** Umsetzungsmöglichkeiten zukünftiger intelligenter Stromnetze unter Berücksichtigung technischer, regulatorischer und ökonomischer Rahmenbedingungen
- Krätzer, T.\*:** Belastbarkeit von Hoch- und Höchstspannungs-Kabelanlagen in Rohrsystemen
- Kühnert, D.:** Entwicklung einer intelligenten Ladesteuerung für Elektrofahrzeuge in einem Mobility-On-Demand-Konzept unter der Nutzung lokaler regenerativer Energien
- Liebmann, R.\*:** Wertorientierte Unternehmensführung von Verteilnetzbetreibern durch Optimierung der Werttreiber Investition und Instandhaltung
- Safargholi, F.:** Ansätze zur Identifizierung der dominanten Oberschwingungsquelle am Netzanschlusspunkt
- Wiesenhütter, E.\*:** Untersuchung der Auswirkungen von Oberschwingungen höherer Ordnung auf elektrische Betriebsmittel in Energieverteilungssystemen, insbesondere auf Transformatoren
- Würfel, M.\*:** Universelle dynamische Netzberechnung

\* externe Promotion



## Untersuchungen an der Spitze-Spitze-Elektrodenanordnung mit großen Elektrodenabständen bei Blitzstoßspannungen

Dipl.-Ing. Akif Gürlek

Das Hauptanliegen dieses Forschungsvorhaben besteht darin, einen Beitrag zur Modellierung des rückwärtigen Überschlages zu leisten. In heutigen Simulationsprogrammen wie ATP/EMTP stehen beispielsweise für Netzsimulationen zur Isolationskoordination lediglich mathematisch ungenaue Modelle (messtechnisch nicht verifiziert) für die Berechnung schnellveränderlicher Vorgänge infolge direkter Blitzeinschläge in den Leitern zur Verfügung. Bisher wird das Verhalten des rückwärtigen Überschlages für eine statistische Auswertung nicht in Betracht gezogen oder es werden Werte (aus mathematischer Modellierung) mit einem hohen Sicherheitsfaktor beaufschlagt.

Im Rahmen der Arbeit von Shirvani [1] konnte erstmals das Durchschlagverhalten bei Blitzspannung messtechnisch ermittelt und anschließend beschrieben werden. Um die Messung zu realisieren, wurde ein Messsystem entwickelt, mit welchem kleine Vorentladeströme (wenige 10 A) bei sehr hoher Spannung (bis zu 2,4 MV) aufgenommen werden können. Des Weiteren wurde mit einer Hochgeschwindigkeitskamera eine Fotosequenz mit einer Bildreihenfolge von bis zu 8 Bildern aufgenommen. Für die Ermittlung des grundsätzlichen Verhaltens wurden Messungen an einer Spitze-Platte-Elektrodenanordnung durchgeführt.

Für den realen Anwendungsfall des rückwärtigen Überschlages verlangt es jedoch nach weiteren Forschungsbedarf. Hier gilt es, die im Grundsatz ermittelten Zusammenhänge an einer realen Elektrodenersatzanordnung zur Nachbildung eines Hochspannungsfreileitungsisolators zu prüfen und nachzuweisen. Werden lediglich die Lichtbogenschutzarmaturen des Isolators betrachtet, so ist der Anordnung zu entnehmen, dass sie zwei gegenüberliegende Spitzen darstellen. Um den Isolator zu Messzwecken auf eine Ersatzanordnung zu überführen, wird sich für eine Spitze-Spitze-Elektrodenanordnung entschieden.

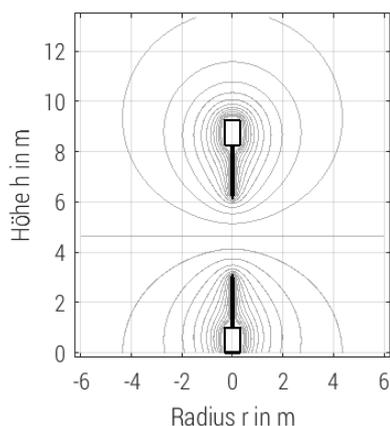


Abbildung 1: Messanordnung zur synchronen Erfassung der Vorentladeströme beidseitiger Elektroden

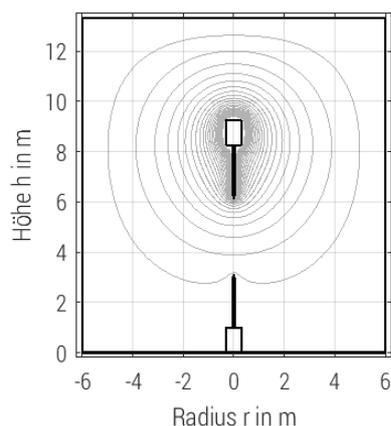
Für diese symmetrische Elektrodenanordnung kann nicht explizit gesagt werden von welcher Elektrode die Entladung beginnen bzw. welche Elektrode den höchsten Einfluss auf das Entladungsverhalten bei einem Durchschlag hat. Aus diesem Grunde bedarf es an beiden Seiten der Elektroden einer gleichzeitigen Messung des Stromes. Hierfür wurde ein Messsystem entwickelt (siehe Abbildung 1), bei dem eine synchrone Messung des Vorentladungsstroms an beiden Enden der Elektroden möglich ist. Der Einfluss beider Seiten auf den Durchschlagprozess lässt sich dadurch ermitteln. Neben der Strommessung wird mithilfe einer Bildverstärkerkamera das Entladungsverhalten in einer Bildsequenz aufgenommen.

Im Normalfall kann angenommen werden, dass die Spitze-Spitze-Elektrodenanordnung, von ihrer Geometrie betrachtet, symmetrisch ist. Anhand der Messungen konnte festgestellt werden, dass dieser Sachverhalt nicht zutrifft. Beobachtet wurde dieser Effekt einerseits durch den Spannungsbedarf, welcher sich für positive und negative Polarität der Blitzspannung stark differenziert. Andererseits sind anhand der fotografischen Aufnahmen [1] unterschiedliche Ausprägungen des Entladungsverhaltens für beide Polaritäten zu beobachten.

Wie anhand von Abbildung 1 gezeigt wird, weist die obere Messeinheit das Hochspannungspotential und die untere Messeinheit das Erdpotential auf. Die geometrische Anordnung der Spitzenelektroden ist zwar symmetrisch, die elektrische Anordnung hingegen ist unsymmetrisch. Elektrisch betrachtet besteht eine Symmetrie nur dann, wenn eine der Messeinheiten eine positive Polarität der Spannung  $+U$  und die Andere eine negative Polarität der Spannung  $-U$  mit demselben Betrag aufweist. Anhand der Gegenüberstellung der Äquipotentiallinien in Abbildung 2, wird das elektrische Verhalten deutlich.



a) Symmetrische Anordnung (ideal)



b) Unsymmetrische Anordnung (technisch)

Abbildung 2: Äquipotentiallinien bei symmetrischer und unsymmetrischer Parametrierung der Spitze-Spitze-Elektrodenanordnung

Abbildung 2a stellt die Äquipotentiallinien einer ideal symmetrischen Anordnung dar, wohingegen Abbildung 2b die technisch nutzbare Anordnung zeigt. Beiden gemein ist die Dimensionierung der Messeinheiten und ihre räumliche Anordnung. Bei der unsymmetrischen Anordnung wird zusätzlich die Umgebung als Störquelle betrachtet. Im symmetrischen Fall ist die obere Messeinheit mit einem Spannungsscheitelwert  $+U_{d50}/2$  und die untere Messeinheit mit dem Spannungsscheitelwert  $-U_{d50}/2$  parametrisiert. Bei der unsymmetrischen Anordnung weist die obere Messeinheit einen Spannungsscheitelwert von  $U$  auf, wohingegen die untere Messeinheit und die Umgebung die Spannungsscheitelwerte  $0$  kV aufweisen.

Erwartungsgemäß sind die Äquipotentiallinien im symmetrischen Fall symmetrisch bezüglich der Rotationsachse  $r$  und der Mitte des Elektrodenabstandes  $s/2$ , dessen Äquipotentiallinien zu den Spitzenelektroden hin näher beieinanderliegen. Die Äquipotentiallinien beim unsymmetrischen Fall unterscheiden sich stark vom symmetrischen Fall. Diese konzentrieren sich um die Messeinheit am Hochspannungspotential, wobei eine Verengung an den Kanten der Messeinheit und verstärkt an der Spitzenelektrode wahrzunehmen ist. Die Äquipotentiallinien an der Spitzenelektrode am Erdpotential sind schwach ausgeprägt. Der Einfluss der Spitzenelektrode am Erdpotential ist dennoch gegeben.

Anhand der Abbildung 2 lassen sich nun die Feldverläufe ermitteln. Nach Berechnung der Feldstärke  $\vec{E}$  zwischen den beiden Spitzenelektroden

$$\vec{E} = -\text{grad}(\varphi) = -\left(\frac{d\varphi_x}{dx} + \frac{d\varphi_y}{dy} + \frac{d\varphi_z}{dz}\right)$$

wird der Feldstärkeverlauf entlang der kürzesten Feldlinie zwischen den beiden Spitzenelektroden (entlang der Rotationsachse  $r$ ) in Abbildung 3 bei positiver Polarität der Blitzspannung dargestellt.

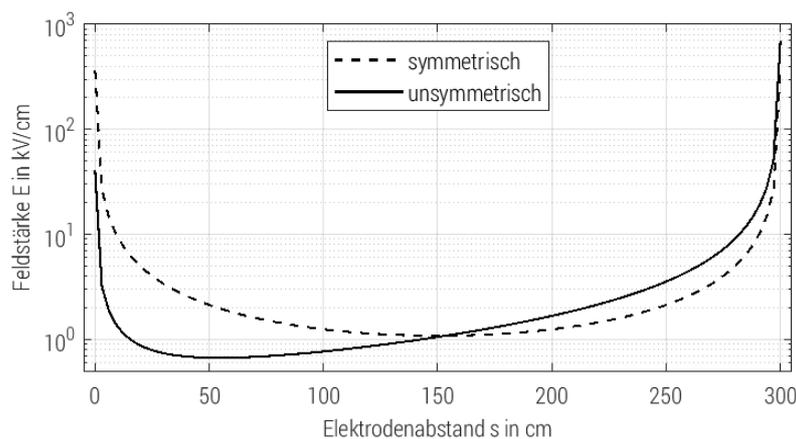


Abbildung 3: Feldstärkeverlauf für die symmetrische und unsymmetrische Parametrierung der Spitze-Spitze-Elektrodenanordnung

In Abbildung 3 sind Unterschiede zwischen beiden Fällen erkennbar. Während im symmetrischen Fall zunächst ein Absinken der Feldstärke an der Spitzenelektrode am Hochspannungspotential ( $s = 300$  cm) wahrzunehmen ist, steigt dieser ab Mitte des Elektrodenabstandes ( $s = 150$  cm) wieder an. Durch die entgegengesetzte Polarität, die gleichen Beträge sowie ohne externe Störeinflüsse, ist der Feldstärkeverlauf am Mittelpunkt des Elektrodenabstandes ( $s = 150$  cm) gespiegelt und demzufolge symmetrisch. Das Maximum der Feldstärke an der Spitzenelektrode am Erdpotential ( $s = 0$  cm) entspricht dem an der Spitzenelektrode am Hochspannungspotential ( $s = 300$  cm):

$$E(s=0 \text{ cm}) = E(s=300 \text{ cm})$$

Beim unsymmetrischen Fall ist beim Elektrodenabstand  $s = 0$  cm das Potential  $U = 0$  kV. Beim Elektrodenabstand  $s = 300$  cm hingegen beträgt das Potential  $U = U_{d50}$ . Zunächst lässt sich feststellen, dass sich das Maximum der Feldstärke an der Spitzenelektrode am Hochspannungspotential befindet. Beginnend von der Spitzenelektrode am Hochspannungspotential sinkt die Feldstärke zunächst stark ab, wobei sie dann abflacht. Kurz vor der Spitzenelektrode am Erdpotential ist ein Wiederanstieg der Feldstärke zu erkennen. Der Wert der Feldstärke an der Spitzenelektrode am Erdpotential ist viel geringer als an der Spitzenelektrode am Hochspannungspotential:

$$E(s=0 \text{ cm}) \ll E(s=300 \text{ cm})$$

Dieser Zusammenhang lässt die Schlussfolgerung zu, dass die Entladungen hauptsächlich an der Spitzenelektrode am Hochspannungspotential wahrzunehmen sind bzw. der Spannungsbedarf zur Erzeugung der Entladungen an der Spitzenelektrode am Hochspannungspotential gegenüber der Spitzenelektrode am Erdpotential geringer ist.

- [1] Gürlek, A.; Shirvani A.; Schufft, W.: Electrical Measurements and Photographic Acquisition of Pre-discharges on Long Rod-Rod Air Gaps under Lightning Impulse Voltage. 20th International Symposium on High Voltage Engineering, Buenos Aires, 2017. 978-987-45745-5-8



## **Klassifizierung des Zustandes von Mittelspannungskabelmuffen anhand des Teilentladungsverhaltens - Ansätze zur priorisierten Instandhaltung**

M. Sc. Kai Jacob

Im Zuge der Energiewende wird der Ausbau erneuerbarer Energien forciert, was zu einer Erhöhung der mittleren Lastflüsse sowie zu starken Schwankungen der Ströme führt. Da neu errichtete Onshore-Anlagen überwiegend die Mittelspannungsebene versorgen, ist von den Netzbetreibern eine gestiegene Ausfallrate der betroffenen Netzabschnitte zu beobachten.

Die Gesamtzuverlässigkeit von Mittelspannungs-Kabelanlagen wird maßgeblich durch die Mittelspannungskabelmuffen bestimmt, da hier eine generell inhomogenere Feldverteilung vorherrscht. Es ist daher zu erwarten, dass sich die geänderten Betriebsbedingungen durch die Einspeisung regenerativer Energien direkt auf die Alterungs- und Zustandsentwicklung von Mittelspannungskabelmuffen auswirkt. Eine beschleunigte Alterung reduziert damit die zu erwartende Lebensdauer der Betriebsmittel, was wiederum den Instandhaltungsaufwand beeinflusst.

Durch geeignete Untersuchungen lassen sich damit entsprechende Handlungsempfehlungen ableiten, welche mittels einer zielgerichteten Zustandsbewertung im Rahmen einer zustandsorientierten Instandhaltung die Folgekosten minimieren.

Neben der in der Praxis häufig anzutreffenden Auswertung der scheinbaren Ladung (TE-Pegel) zur Zustandsbewertung bietet die Berücksichtigung aller messbaren Größen, wie die Pulswiederholrate und TE-Phasenlage bzw. die momentane Spannung, bei der Diagnose den größtmöglichen Informationsgehalt. Daraus lassen sich alterungsrelevante TE-Parameter, wie der mittlere TE-Strom, die mittlere TE-Leistung sowie der mittlere TE-Energieumsatz ableiten. Zudem rückt für die Auswertung eine Anwendung der von Kreuger durchgeführten Evaluation eindeutig definierter TE-Phänomene in Form eines Q-n-Diagramms in den Fokus [1]. Dieses wurde für Stromwechselfersuche erprobt, wobei sich bei entsprechend langer Messdauer Entwicklungspfade des Zustandes ergeben, welche auf ein besonders hohes Schädigungspotenzial durch Teilentladung während der Abkühlung (fabrikneue Muffen) bzw. während der Erwärmung (betriebsgealterte Muffen) hindeuten, wie in Abbildung 1 zu sehen ist. Ausschlaggebend ist eine Parallelverschiebung der Datenpunkte von den Bändern nach Kreuger, je weiter rechts diese liegen, desto schlechter ist der Zustand.

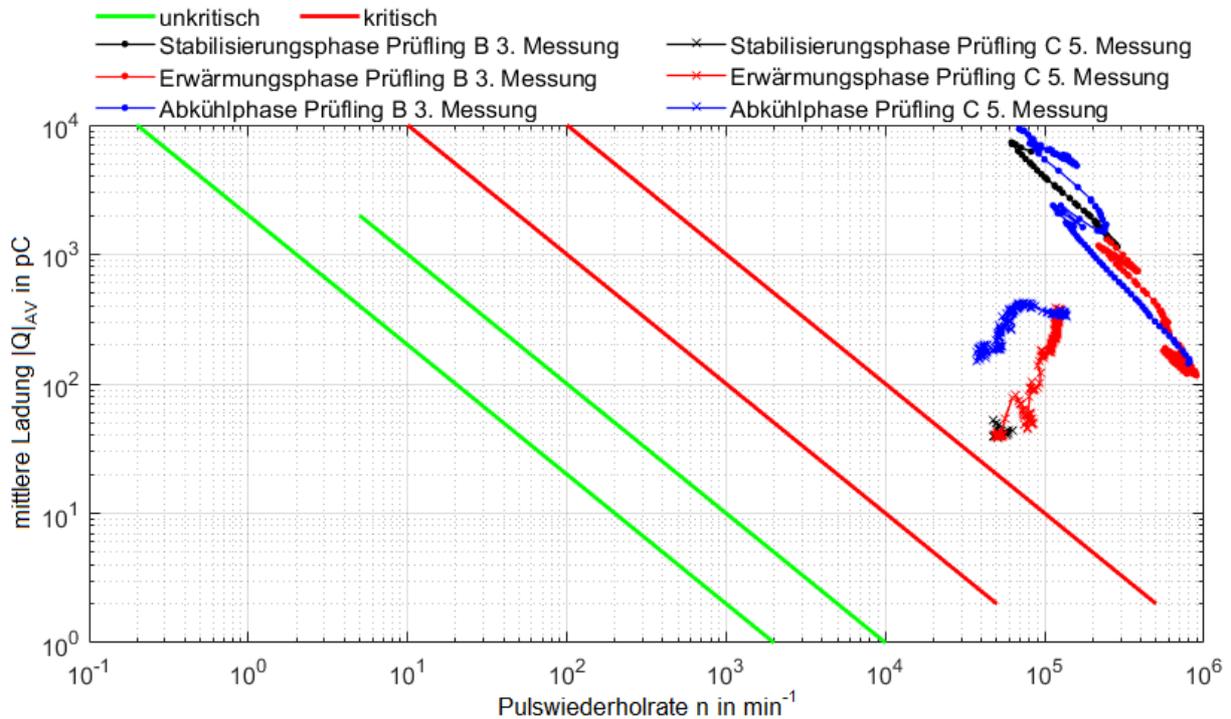


Abbildung 1: TE-Charakterisierung nach Kreuger mittels Q-n-Diagramm für Stabilisierungs-, Erwärmungs-, sowie Abkühlphasen der jeweils letzten Messreihe an einer fabrikneuen Mittelspannungs-Kabelmuffe mit Schrumpffehler (Prüfling B) und einer betriebsgealterten Mittelspannungs-Kabelmuffe (Prüfling C) in 60-s-Intervallen

Durch eine Lokalisierung von TE-Quellen in Mittelspannungs-Kabelanlagen bei Vor-Ort-Messungen lässt sich diese Methode problemlos auch bei einer kurzen Messdauer anwenden, um die detektierten TE-Quellen nach deren Gefährdungspotenzial zu klassifizieren. Damit ließe sich eine Effizienzsteigerung durch den Übergang zu einer priorisierten Instandhaltung realisieren.

Abbildung 2 veranschaulicht die Ergebnisse von 3 Diagnosemessungen an realen Kabelstrecken, wobei sich eine eindeutige Handlungsempfehlung ableiten lässt. Besonders für Mittelspannungs-Kabelstrecken mit mehreren lokalisierten TE-Quellen eignet sich dieses Verfahren besonders gut, um eine Instandhaltungsreihenfolge festzulegen. So sollte die Mittelspannungs-Kabelmuffe der Mittelspannungs-Kabelstrecke B bei 1540 m priorisiert behandelt werden.

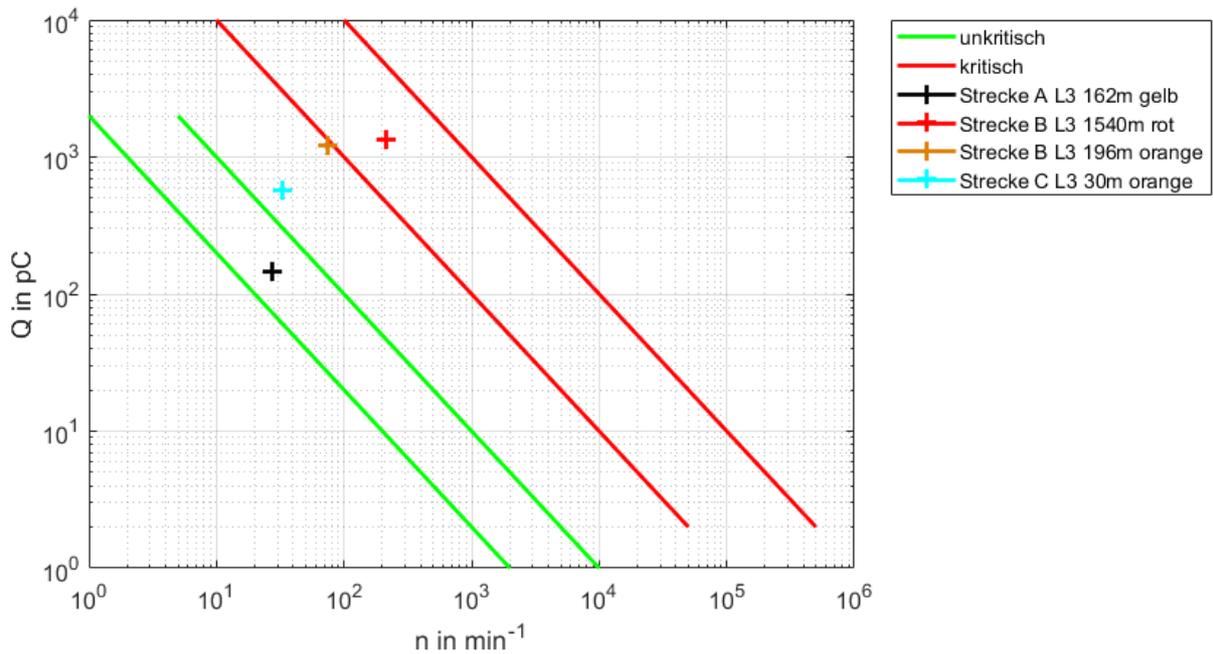


Abbildung 2: TE-Charakterisierung nach Kreuger mittels Q-n-Diagramm zur Realisierung einer priorisierten Instandhaltung

[1] KREUGER, F. H.: *Industrial High DC Voltage: 1. Fields, 2. Breakdowns, 3. Tests*. Delft: Delft University Press, 1995.



## **Erweiterte Optimal Power Flow – Berechnung der Leistungsflüsse bei erzeuger- und verbraucherseitigen Flexibilitätspotenzialen**

M. Sc. Liana Jacob

Im Zuge der Energiewende steigen die Anforderungen für den Netzbetrieb des Elektroenergiesystems aufgrund der zunehmenden Anzahl von fluktuierenden, dezentralen Erzeugungseinheiten. Hierbei ist die große Herausforderung Erzeugung und Verbrauch zeitlich in Einklang zu bringen, um einen maximal möglichen Ertrag aus den regenerativen Energien zu erreichen. Ein vieldiskutierter Ansatz ist der Einsatz von flexiblen Verbrauchern, welche vorwiegend in Verteilnetzen eingebunden werden sollen. Der aktuellen Netzbetriebsführung sind dabei jedoch Grenzen vorgegeben. Neben regulatorischen und ökonomischen Herausforderungen ist zudem der Netzbetrieb auf Basis der Leistungsflussberechnung und der Optimal Power Flow – Berechnung [1] zu nennen. Bei beiden Berechnungsarten werden den Verbrauchern unveränderliche Leistungswerte zugewiesen. Lediglich durch die Veränderung bzw. Optimierung der Leistungswerte der Erzeugungseinheiten ist ein Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch realisierbar. Für einen Einsatz von flexiblen Verbrauchern ist dies jedoch nicht ausreichend, da hierfür eine gleichzeitige Veränderung bzw. Optimierung der Leistungswerte der Erzeugungs- und Verbrauchseinheiten vorauszusetzen ist.

Durch Erweiterung des Optimal Power Flow-Problems durch zusätzliche Randbedingungen bezüglich der Verbraucher soll nun ein Lösungsansatz zur Abbildung und Berechnung des zukünftigen Netzbetriebs entwickelt werden. Dies erfolgt mit Hilfe des Berechnungstools MATPOWER, basierend auf dessen erweiterbarer Architektur [2]. Als Eingangsdaten gelten Erzeugungsprofile, Verbrauchsprofile sowie die Flexibilitätsgrade. Die Ergebnisse der Berechnungen stellen die optimalen Betriebszustände der Erzeugungs- und Verbrauchseinheiten im Rahmen der vorgegebenen Flexibilität dar.

### **Erprobung des Algorithmus**

Zur Erprobung des Algorithmus diente ein Mittelspannungsnetz aus der Arbeit von Malekian et al. [3]. Basierend auf diesen Netzdaten wurde der Algorithmus zum Zwecke einer Verlustminimierung sowie einer Kostenminimierung getestet. In beiden Szenarien wurden je fünf Flexibilitätsgrade aller Verbraucher und Erzeuger angenommen. Die Flexibilitätsgrade verstehen sich als prozentualer Anteil, bezogen auf den jeweiligen Istwert der flexiblen bzw. steuerbaren Einheit, und liegen bei 0, 25, 50, 75, 100 %. Ein Flexibilitätsgrad von 0 % entspricht der permanenten Einhaltung des Istwertes während der Optimierung. Der Flexibilitätsgrad von 100 % bedeutet, dass eine bestimmte Einheit der Verbraucher oder der Erzeuger deren Leistung verdoppeln beziehungsweise eine Abschaltung zulassen kann.

### Beschreibung des Netzes

Das verwendete Netz, Abbildung 1, entspricht einem ländlichen Mittelspannungsnetz. Der Wirkleistungsbedarf im Netz beträgt 39,9 MW. Dieser wird zu 50 % durch lokale Erzeuger abgedeckt. Der restliche Wirk- und Blindleistungsbedarf wird durch das externe Netz bereitgestellt. Die Deckung der Verluste erfolgt ebenfalls durch das externe Netz.

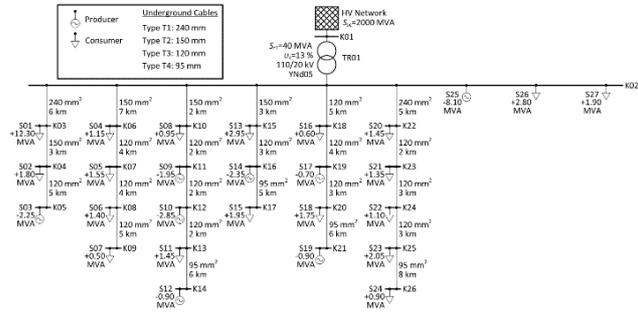


Abbildung 1: Beispielnetz MV-Rural-26 Bus-Network aus [3]

### Ergebnisse der Verlustminimierung

Die Nachbildung der verlustminimierten Leistungsflüsse im Netz kann als Sonderform der Kostenminimierung nachgebildet werden. Hierbei wird der Algorithmus so parametrisiert, dass identische, von Null verschiedene Betriebskosten als Gewichtungsfaktoren für alle steuerbaren Einheiten des Netzes bestehen. Dadurch entspricht die Zielfunktion der Optimierung einer Minimierung der Differenz zwischen dem Wirkleistungsbedarf und der Wirkleistungsbereitstellung. Wie aus Abbildung 2 entnommen werden kann, nehmen die Wirkleistungsverluste mit der Erhöhung des Flexibilitätsgrades der Erzeuger sowie der Verbraucher deutlich ab. Diese betragen bei einem hundertprozentigen Flexibilitätsgrad aller Verbraucher und Erzeuger nur noch um die 30 % des ursprünglichen Verlustbetrags. Generell sind die Ergebnisse stark abhängig von der Topologie. Für das bestimmte Netz ist im Sinne einer Verlustminimierung eine Anhäufung des Verbrauchs und der Erzeugung um die Hauptsammelschiene zu erwarten, sodass Transportwege reduziert werden können. Eine Erläuterung der Ergebnisse ist aus dem Beitrag [4] zu entnehmen.

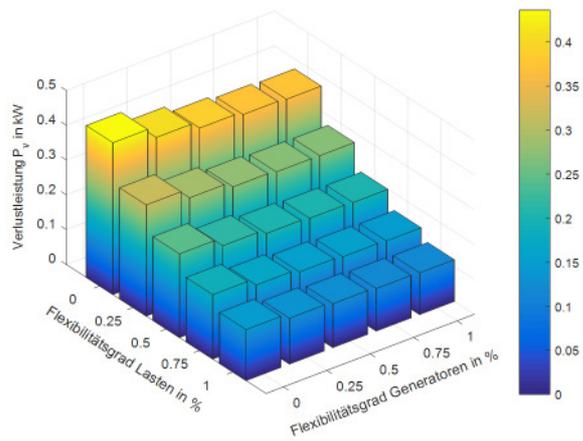


Abbildung 2: Verlustleistung als Funktion des Flexibilitätsgrades

### Ergebnisse der Kostenminimierung

Zur Erprobung des Algorithmus im Sinne einer Kostenminimierung wurden unterschiedliche Kostenfunktionen angenommen. Die Kosten der Flexibilitätspotenziale der Verbraucher betragen in diesem Szenario -200x, die der lokalen Erzeuger 200x und die des externen Netzes 400x. Die Variable x steht für die Menge bereitgestellter Wirkleistung der jeweiligen Einheit. Die Ergebnisse zeigten, dass bei einem hundertprozentigen Flexibilitätsgrad der Erzeuger und Verbraucher, die Wirkleistungsbereitstellung durch das teure externe Netz stark reduziert wird. Der Wert der Kostenfunktion geht in diesem Fall gegen Null, aufgrund der gleichen Beiträge der Kosten für die Flexibilitätspotenziale der Verbraucher und der lokalen Erzeuger. Dadurch ist die richtige Rechenweise des Algorithmus nachweisbar. Entsprechende Ergebnisse sind aus Abbildung 3 ersichtlich. Ein Kostenminimum wird bei einem hundertprozentigen Flexibilitätsgrad aller Verbraucher und Erzeuger erreicht. Hierbei kompensieren sich die positiven Kosten der Flexibilitätspotenziale der Erzeuger mit den negativen Kosten der verbraucherseitigen Flexibilitätspotenziale. Bestehende Kosten werden demzufolge nur noch durch die Verluste, welche durch das externe Netz abzudecken sind, verursacht. Da das externe Netz durch die zugewiesenen Kosten als teure Erzeuggereinheit gilt, erfolgt die Bilanzierung der Leistungsflüsse über die lokalen Erzeuggereinheiten. Dies führt jedoch dazu, dass bei Erhöhung der erzeugerseitigen und verbraucherseitigen Flexibilitätspotenziale die Verluste im Netz zunehmen. Höchste Verluste sind für den Fall, dass die Verbraucher deren ursprünglichen Istwerte einhalten, während deren Versorgung ausschließlich durch die lokalen Erzeuger erfolgt, zu verzeichnen. Entsprechende Ergebnisse sind auf Abbildung 4 dargestellt.

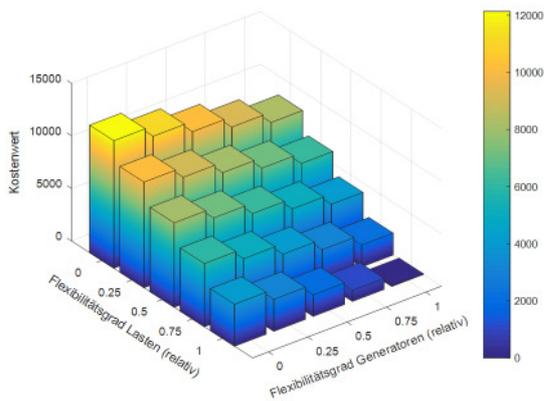


Abbildung 3: Kostenwert als Funktion der Flexibilitätsgrade

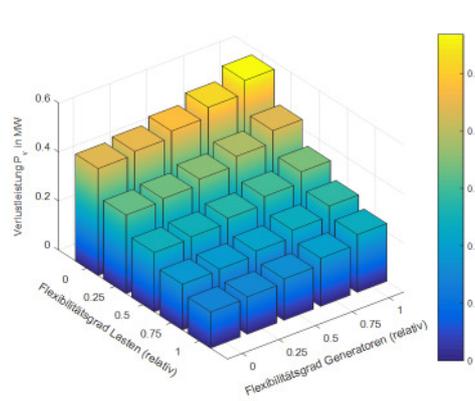


Abbildung 4: Verlustleistung als Funktion der Flexibilitätsgrade

## Zusammenfassung

Das Berechnungstool MATPOWER ermöglicht eine Erweiterung des OPF-Algorithmus zur Berücksichtigung von erzeuger- sowie verbraucherseitiger Flexibilität. Durch Deklaration von Flexibilitätsgraden für Verbraucher und Erzeuger konnten entsprechende Potenziale zur Verlust- sowie Kostenminimierung eingesetzt werden. Der erweiterte OPF-Algorithmus, welcher aus dem Posterbeitrag [4] entnommen werden kann, ist prädestiniert für die Erstellung von Day Ahead-Prognosen in Bilanzkreisen sowie für den Ausgleich positiver und negativer Prognosefehler. Dadurch, dass die Berechnungen auf dem AC-Modell basieren, ist eine präzise Beschreibung der Leistungsflüsse im Netz möglich. Durch die Konvergenz der Berechnung zur Ermittlung des OPF-Problems sind die statische Stabilität sowie die Einhaltung technischer Grenzwerte im Netz vorausgesetzt.

- [1] Frank, S., Rebennack, S.: An Introduction to optimal power flow: Theory, formulation and examples. IEE Transactions, 2016
- [2] Zimmermann, R. D., Murillo-Sanchez, C, E.: MATPOWER 6.0b1 User's Manual. 2016
- [3] Malekian. K. et al.: Characteristic Parameters and Reference Networks of German Distribution Grid (LV, MV, and HV) for Power System Studies, ETG Congress, 2017
- [4] L. Jacob, J. Teuscher, W. Schufft, "Erweiterte Optimal Power Flow – Berechnung zur Abbildung des Netzbetriebes auf Basis von erzeuger- und verbraucherseitigen Flexibilitäten in Verteilnetzen," Posterbeitrag, ETG-CIRED-Workshop 2018, VDE Tec Summit, Nov. 2018.





## **Umsetzungsmöglichkeiten zukünftiger intelligenter Stromnetze unter Berücksichtigung technischer, regulatorischer und ökonomischer Rahmenbedingungen**

M. Sc. Benjamin Jacobsen

Das europäische Elektroenergieversorgungssystem hat sich über die letzten Jahrzehnte stark verändert. Dieser Transformationsprozess hat das System von eher starren Strukturen und einem einseitig gerichteten Energiefluss zu einem Wirtschaftszweig mit einer großen Vielfalt von Akteuren und bidirektionalem Energie-, Informations- und Finanzfluss gewandelt. Zusätzlich sorgt die vermehrte dezentrale Elektroenergieeinspeisung aus erneuerbaren Energien und eine zunehmende Flexibilisierung auf Verbraucherseite zu einer stark volatilen Auslastung der Netzkapazitäten. Dies kann zu Netzengpässen mit möglichen Versorgungsunsicherheiten durch Überlastung von Betriebsmitteln führen. Der Versorgung mit elektrischer Energie, kommt allerdings eine große Bedeutung zu. Dies wird unter anderem im Energiewirtschaftsgesetz mit der Forderung nach einer sicheren, preisgünstigen, verbraucherfreundlichen, effizienten und umweltverträglichen Versorgung der Allgemeinheit mit Elektrizität deutlich. Weiterhin beruht ein großer Teil der täglich genutzten Infrastruktur auf der Verfügbarkeit elektrischer Energie, welche damit einen großen Beitrag zum Bruttoinlandsprodukt aber auch zum Erhalt der hohen Lebensqualität und des hohen Lebensstandards beiträgt.

Somit muss auch in Zukunft die Versorgungssicherheit und damit die Netzstabilität ein Hauptaugenmerk beim Betrieb des Energieversorgungssystems darstellen. Die geplante Dissertation soll einen Beitrag zur technisch umsetzbaren, ökologisch nachhaltigen und ökonomisch vorteilhaften Netzstabilisierung leisten.

Zunächst wird auf die Regularien, welche die Netzstabilität betreffen, eingegangen (u.a. DIN EN 50160, EnWG), deren technische Bedeutung erörtert und bewertet. Auf dieser Grundlage werden kritische Netzsituationen bestimmt, diese werden mit dem bestehenden BDEW-Ampelkonzept (BDEW – Bundesverband Energie- und Wasserwirtschaft) verglichen und gegebenenfalls angepasst. Unter kritischen Netzsituationen sind in dieser Arbeit temporäre, lokal vorherrschende Unstetigkeiten zu verstehen, bei deren Auftreten mit Ausfällen von Betriebsmitteln oder nicht ordnungsgemäßer Funktion von netzgebundenen Geräten zu rechnen ist. Kritische Netzsituationen stellen damit eine Gefahr für die Versorgungssicherheit des elektrischen Energieversorgungsnetzes dar. Zu den Größen, welche kritische Netzsituationen hervorrufen können, zählen unter anderem zu hohe Spannungsabweichungen, zu hohe Ströme, zu hohe Oberschwingungsanteile und ein zu hoher / niedriger Leistungsfaktor. Mit Rücksicht auf die Komplexität und den Umfang der Analysen wird der Fokus auf einzelne Größen gelegt werden müssen. Eine vollständige Betrachtung aller Regelparameter kann nicht abgedeckt werden.

Die Erarbeitung von Einflussgrößen auf kritische Netzzustände steht in engem Zusammenhang mit dem genannten Ampelkonzept des BDEW zur Darstellung des Netzzustandes bzw. der Netzauslastung. Dieses Konzept bildet mit seinen drei Phasen die Grundlage zur Aktivierung entsprechender Netzstabilisierungsmaßnahmen. Solange sich keine der zuvor untersuchten Größen zu bspw. 80 % der Grenze zur kritischen Netzsituation annähert, liegt die grüne Ampelphase vor und es werden keine Maßnahmen ergriffen. Sobald ein Schwellenwert überschritten ist, wird die Gelbe Phase ausgerufen. Die Belastungsgrenze des Netzes ist bald erreicht und es müssen entsprechende Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Der Energiemarkt sollte ab diesem Punkt nichtmehr rein marktdienlich, sondern zunehmend system- und netzdienlich agieren. Bei

dieser Situation kommt der Mehrwert der geplanten Dissertation zum Tragen. Bislang stellt sich die Frage, auf welche Maßnahmen zur Vermeidung von Netzüberlastung primär zurückgegriffen werden sollte, um eine möglichst hohe Effizienz bei der Netzstabilisierung zu gewährleisten. Diese Entscheidung muss durch den Netzbetreiber entsprechend der vorherrschenden Netz-, Last- und Einspeisestruktur getroffen werden. Zunächst kann dabei grob zwischen drei Varianten unterschieden werden:

1. Herkömmlicher Netzausbau
2. Alternativer / intelligenter Netzausbau mit Längs- und Quer-Kompensationseinrichtungen
3. Kein Netzausbau – Demand- and Supply-Side-Management – Anreize Laststeuerung und Vergütung der Einspeiseminderung oder Anreize zum Einbau entsprechender Speicher am Anschlusspunkt

Für diese Varianten werden entsprechende Maßnahmen und Methoden hinsichtlich ihrer Wirksamkeit für die Stabilisierung der Größe, welche zur kritischen Netzsituation führt, technischem Aufwand, technischer Umsetzbarkeit, Kosten sowie möglichen Synergien zu weiteren Größen (bspw. Einfluss der Blindleistungsregelung auf die Netzspannungsstabilisierung) in unterschiedlichen Netzstrukturen analysiert. Dabei wird Bezug auf bereits vorhandene Forschungsergebnisse genommen. Es ist zu beobachten, dass es eine Vielzahl von Studien und bereits angewendeten technischen Lösungen zur Netzstabilisierung gibt. Allerdings handelt es sich dabei zumeist um Inselösungen und isolierte Betrachtungen, welche nicht ohne entsprechende Anpassungen und damit notwendige erneuter Wirtschaftlichkeitsbewertung für reelle Netze anwendbar sind. Die Möglichkeiten zur Netzstabilisierung sollen in verschiedenen Netzstrukturen möglichst realitätsnah bewertet werden. Dazu werden verschiedene kritische Netzsituationen erzeugt und überprüft, mit welchem Verfahren möglichst effizient entgegengewirkt werden kann. Zur Simulation werden unter anderem die Programme MATPOWER und PowerFactory dienen.

Das Ziel der Dissertation ist die Entwicklung und Evaluation einer Methode zur Bestimmung effizienter Netzstabilisierungsmaßnahmen unter Berücksichtigung der vorherrschenden Netzstrukturen. Neben der Netzstruktur werden im Netz befindliche Betriebsmittel sowie Lasten und Erzeuger berücksichtigt. Dabei wird Bezug auf das Ampelkonzept des BDEW genommen.

Diese Methode kann beispielsweise in einer Software umgesetzt werden, welche nach Einlesen der Netzstruktur mit ihren Betriebsmitteln und der Vorgabe entsprechender Lastsituationen die effizienteste Variante (Kosten-/ Nutzenvergleich) zur Bewältigung kritischer Netzsituationen bestimmt.



## **Entwicklung einer intelligenten Ladesteuerung für Elektrofahrzeuge in einem Mobility-On-Demand-Konzept unter der Nutzung lokaler regenerativer Energien**

Dipl.-Ing David Kühnert

Der Mobilitätssektor befindet sich aktuell in einem Wandel, welcher vor allem umweltpolitisch getrieben ist. Dabei sind im Wesentlichen die Endlichkeit von fossilen Energieträgern und die Klimaveränderung, einhergehend mit dem Ausstoß von Treibhausgasen zu nennen. Auch die aktuellen Diskussionen um Schadstoffausstoße von Benzin und Dieselfahrzeugen können durch Elektrofahrzeuge, zumindest lokal in Städten adressiert werden. Es ist dabei von wesentlichem Interesse, dass Elektrofahrzeuge möglichst mit Energie aus erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen geladen werden sollten, da sonst lediglich eine Verlagerung des Schadstoffausstoßes erreicht wird. Eine intelligente Laderegulation kann erreichen, dass die hohe Effizienz von Elektrofahrzeugen in Kombination mit dem Laden erneuerbarer Energien zu einer nachhaltigeren Mobilität führt. Ziel des Dissertationsvorhabens ist, eine intelligente Laderegulation zu entwickeln, um genau diesen Punkt mit der Mehrbelastung des Energieversorgungssystems und dem Mobilitätsbedarf der Fahrzeugnutzer zu verbinden.

Die Nutzung von Individualmobilität ist vor allem dadurch gekennzeichnet, dass Fahrzeuge einen sehr großen Anteil eines Tages parken, Zeiten, an denen Sie als flexible Lasten zur Verfügung stehen könnten. Aber auch Fahrzeuge welche in modernen Mobilitätskonzepten, wie z.B. Car-Sharing, eingesetzt werden, können für die Steuerung genutzt werden. Diese Fahrzeuge verhalten sich aus Sicht der Ladeverfügbarkeit, wie Private Fahrzeuge, welche kurzzeitig, z.B. zum Einkaufen, an Ladesäulen abgestellt werden. In dieser Arbeit wurde an erster Stelle auf die Steuerung der Ladezeitpunkte Bezug genommen, was vor allem durch die Beschränkungen der standardisierten Mode-3-Kommunikation begründet ist. Das Hauptziel der Arbeit ist es, die Ladezeitpunkte so zu optimieren, dass der Anteil erneuerbarer Energie in der Ladeenergie eines Fahrzeuges maximal ist. Die weiteren Randbedingungen dürfen dabei jedoch nicht vernachlässigt werden.

Betrachtet man das Problem aus regelungstechnischer Sicht, lässt sich eine Ladesteuerung, welche korrekterweise eher eine Laderegulation darstellt, durch einen einfachen Regelkreis beschreiben. Dieser wird in *Abbildung* gezeigt. Als bekannte Eingangsgrößen (grün dargestellt) zählen die 15-Minuten-Durchschnittsleistung von Verteilnetzlast und erneuerbaren Energien, sowie der zu ladende Energiebedarf, welcher sich aus Ladezustand und Fahrenergiebedarf ergibt. Für den Regelkreis relevante Beschränkungen (rot dargestellt), sind die Ladeleistung (definiert durch Mode 3 und den technischen Limitationen des Fahrzeuges), sowie der Mobilitätsbedarf, welcher in einem Car-Sharing-Konzept mit möglichst häufig verfügbar sein muss. Die einzige Stellgröße um die Ladung eines Elektrofahrzeuges zu beeinflussen ist der blau dargestellte Ladezeitpunkt.

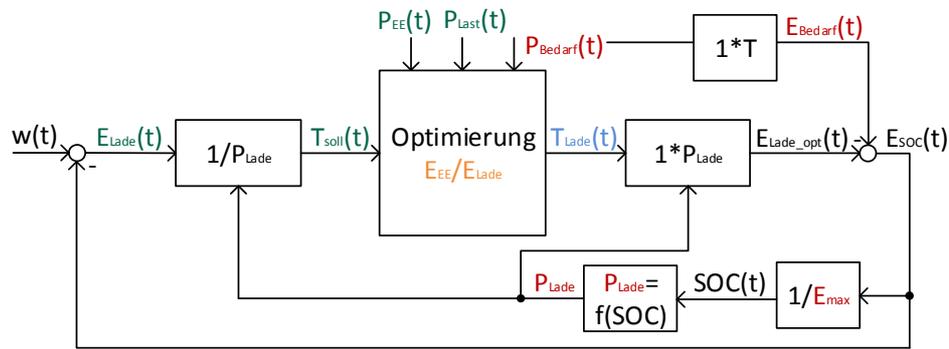


Abbildung 1: Regelkreis zur Beschreibung einer Laderegelung eines Elektrofahrzeuges aus energietechnischer Sicht

Für den Kern des Regelkreises, der Optimierung, wurden drei Ansätze untersucht. Ein Ansatz war es auf einen mathematischen Optimierungsalgorithmus zurückzugreifen, welcher mittels Schwarmintelligenz eine Vielzahl von Lösungen betrachtet und am Ende die passende auswählt. Für das Finden eines „Ladepfades“ wurde der Ameisenalgorithmus genutzt. Problem jedes Optimierungsalgorithmus ist es, dass er versucht ein definiertes Ziel möglichst optimal zu erreichen. Im Falle einer Laderegelung soll jedoch auch geladen werden, wenn kein wirklicher Energiebedarf besteht, d.h. ohne definierbares Ziel. Setzt man den Algorithmus ein erhält man keine relevante Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energie in der Ladeenergie, weshalb der Ansatz verändert wurde.

Daraus entstand der Ansatz der Priorisierung von Ladezeitpunkten. Dieser Ansatz gibt im Fall eines nicht vorhandenen Energiebedarfes einen Schwellwert für das Verhältnis aus erzeugter erneuerbarer Energie und der Last des Verteilnetzes vor, welcher dynamisch anhand historischer Verhältnisse angepasst wird. Dadurch kann im Fall ohne Bedarf eine erhebliche Verbesserung erreicht werden, welche größer ist, als die Verbesserung durch den rechenzeitaufwändigen Optimierungsalgorithmus. Im Bedarfsfall wurde deshalb die Vereinfachung vorgenommen, dass an jedem Zeitpunkt, für den Zeitraum von zwei Stunden, ermittelt wird welche Energiemenge geladen werden muss und wie viele Zeitpunkte dafür benötigt werden. Die Verhältnisse von erzeugter erneuerbarer Energie und der Last des Verteilnetzes werden, um Prognosefehler zu berücksichtigen, mit Faktoren beaufschlagt, d.h. je später der Zeitpunkt im Prognoseintervall, desto stärker wird das dann auftretenden Verhältnis abgewertet. Anschließend erhält man eine Rangfolge für Ladezeitpunkte, sodass an den besten Zeitpunkten geladen wird.

Der dritte Ansatz folgt einer klassischen Optimierung mittels einer Gütefunktion. Die Gütefunktion wird dabei durch Erfahrungen empirisch beschrieben. Jeder Einflussfaktor kann mit einer separaten Teilgütefunktion berücksichtigt werden. In der folgenden Gleichung wurden für erneuerbare Energien, Netzlast und den Ladezustand separate Teilgütefunktionen angenommen. Die Einflussfaktoren und Exponenten wurden mittels Variantenvergleich und genetischer Optimierung bestimmt.

$$\text{Güte} = \frac{1}{A + B + C} \cdot \left( A \cdot \left( \frac{P_{EE}}{P_{EE_{max}}} \right)^a + B \cdot \left( 1 - \left( \frac{P_{Last}}{P_{Last_{max}}} \right)^b \right) + C \cdot \left( 1 - \left( \frac{E_{SOC}}{E_{SOC_{max}}} \right)^c \right) \right)$$

Im Weiteren ist es geplant, diesen sehr gut funktionierenden Ansatz zu nutzen, um einen Scheduling-Algorithmus umzusetzen. Durch die Transformation der Gütefunktion in eine Zielfunktion kann an jedem Zeitschritt eine Optimierung innerhalb des Prognosezeitraumes erfolgen. Hierfür müssen entsprechende Constraints definiert werden, auf die in diesem Bericht nicht eingegangen wird.

Mit dem empirischen Ansatz und der Priorisierung von Ladezeitpunkten konnten sehr gute Verbesserungen des Anteils erneuerbarer Energie an der Ladeenergie erzielt werden. Auch bei einem Zubau erneuerbarer Energieerzeugungsanlagen konnte eine gute Skalierung der Ansätze gezeigt werden. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 1 dargestellt.

*Tabelle 1 - Ergebnisse der Laderegulierung mit den entwickelten Ansätzen*

	Anteil erneuerbarer Energie		
	2012	2013	2014
Ungesteuert	5,71 %	5,73 %	6,31 %
Empirischer Ansatz	17,33 %	18,38 %	22,17 %
Priorisierung von Ladezeitpunkten	18,00 %	17,89 %	21,43 %



## Identifizierung der dominanten Oberschwingungsquelle am Netzanschlusspunkt

M. Sc. Farhad Safargholi

Die Oberschwingungsströme am Netzanschlusspunkt werden durch Anschlussnehmer und durch Netzvorbelastungen beeinflusst. Allerdings wird in bestehenden Normen der Einfluss von Netzvorbelastungen auf die Oberschwingungsströme am Netzanschlusspunkt vernachlässigt. Das bedeutet, in den meisten Normen werden die Wechselwirkungen zwischen der Anschlussnehmeranlage und dem Netz bei der Ermittlung der Emissionsgrenzwerte nicht berücksichtigt. Diesbezüglich ist ein Ansatz zur Untersuchung der Wechselwirkung zwischen der Anschlussnehmeranlage und dem Netz sehr hilfreich. In diesem Zusammenhang sollten folgende Ziele verfolgt werden, um die genannte Herausforderung zu lösen [1-3]:

- Identifizieren der dominanten Oberschwingungsquelle,
- Ermittlung der Oberschwingungsanteile der Anschlussnehmerseite und Netzseite.

In den meisten Beurteilungskonzepten werden die Anschlussnehmer- und Netzseite jeweils durch ein Thevenin-Ersatzschaltbild oder ein Norton-Ersatzschaltbild nachgebildet. Abhängig von dem verwendeten Ersatzschaltbild gibt es zwei gängige Definitionen zur Beschreibung der dominanten Seite:

- die Seite mit der größeren „Ersatzspannungsquelle“ (Thevenin-Ersatzschaltung);
- die Seite mit der größeren „Ersatzstromquelle“ (Norton-Ersatzschaltung).

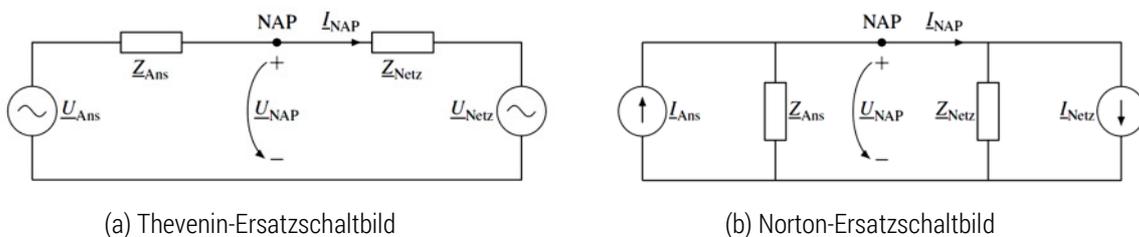


Abb. 1: Ersatzschaltbild der Anschlussnehmer- und Netzseite

Für die Identifizierung der dominanten Ersatzspannung wurde der „Spannung-Strom-Verhältnis“-Ansatz vorgestellt [1]. Dieser Ansatz wurde in [2] und [3] für die Identifizierung des dominanten Ersatzstromes („Strom-Spannung-Verhältnis“-Ansatz) entwickelt. Die Aussage der beiden Ansätze bezüglich der Identifizierung der dominanten Oberschwingungsquelle ist immer richtig, wenn die benötigten Eingangsdaten ohne Messfehler vorhanden sind. Die Herausforderung liegt darin, dass die Kenntnis der Ersatzimpedanzen nicht immer vorhanden ist. In diesem Zusammenhang wurden diese Ansätze weiterentwickelt, um die Identifizierung der dominanten Oberschwingungsquelle ohne die Kenntnis der Impedanzen zu ermöglichen. Zu diesem Zweck ist die Durchführung einer Messung mithilfe einer bekannten Längsimpedanz bzw. Queradmittanz notwendig.

Diesbezüglich sind für die zu messenden OS-Spannungen und OS-Ströme am Netzanschlusspunkt zwei unterschiedliche Zustände notwendig:

- Zustand I: Normalbetrieb (Siehe Abb.2 (a) bzw. (c))
- Zustand II: Mit einer bekannten Längsimpedanz bzw. Queradmittanz (Siehe Abb.2 (b) bzw. (d))

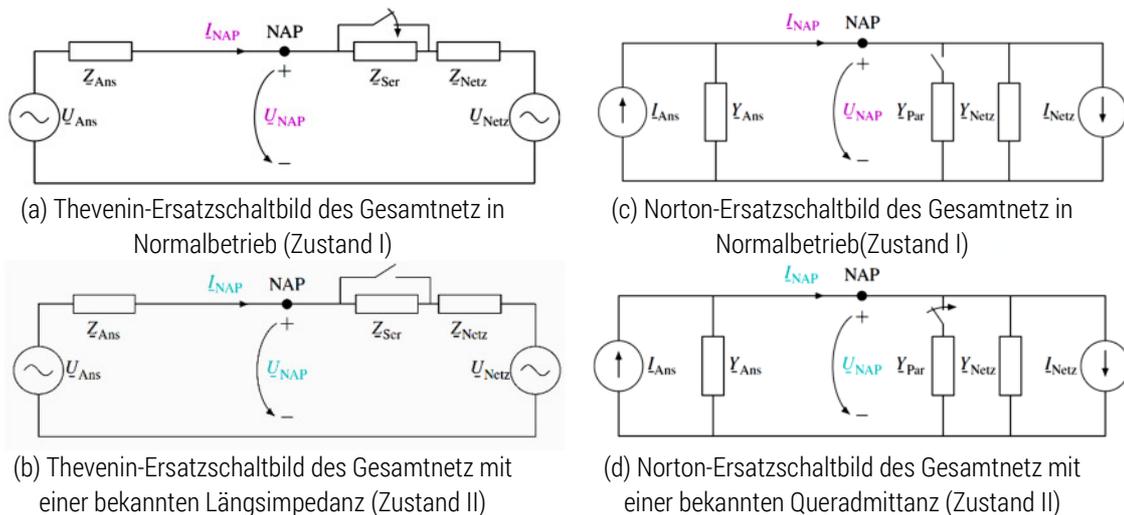


Abb. 2: Schaltzustände zur Anwendung des Spannung-Strom-Verhältnis-Ansatzes mit einer bekannten Längsimpedanz bzw. Queradmittanz.

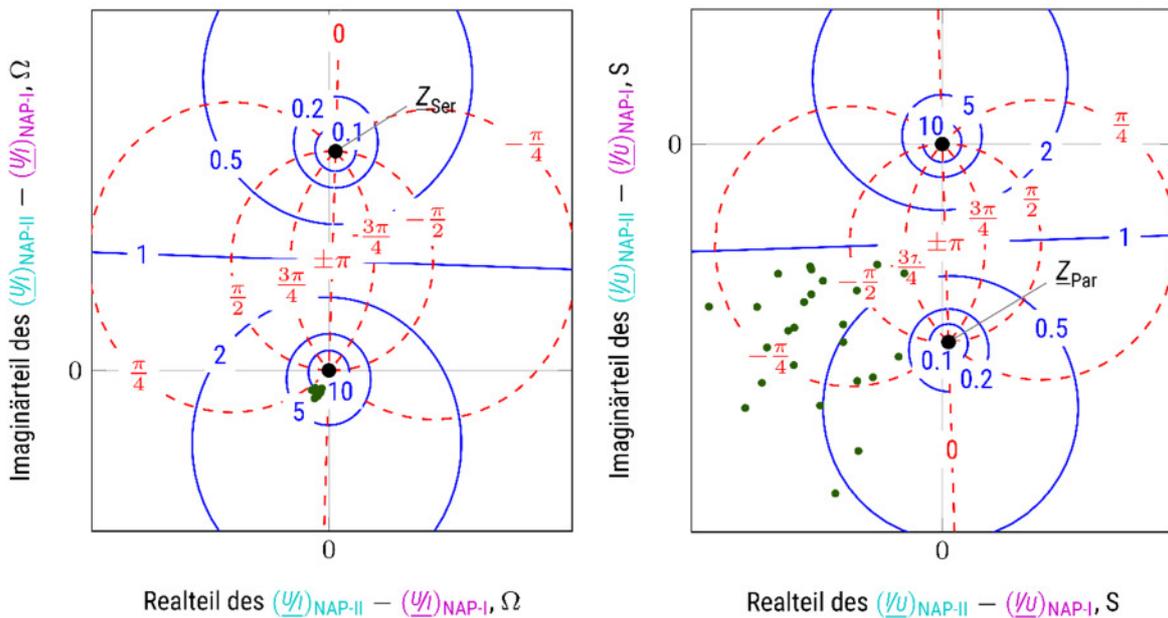
Für die Identifizierung der dominanten Ersatzspannung wurde der Spannung-Strom-Verhältnis-Ansatz mit einer bekannten Längsimpedanz entwickelt [4]. Für die Identifizierung des dominanten Ersatzstromes wurde der Strom-Spannung-Verhältnis-Ansatz mit einer bekannten Queradmittanz entwickelt [4]. Nachfolgend werden die Ansätze mithilfe einer kurzen Beschreibung vorgestellt.

Tabelle. 1: Zusammenfassung der Ansätze mithilfe einer bekannten Längsimpedanz bzw. Queradmittanz zur Identifizierung der dominanten Oberschwingungsquelle.

Ansatz	Spannung-Strom-Verhältnis mit einer bekannten Längsimpedanz	Strom-Spannung-Verhältnis mit einer bekannten Queradmittanz
Eingangsgrößen	Spannung am NAP in zwei Zustände ( $\underline{U}_{NAP-I}$ und $\underline{U}_{NAP-II}$ ), Strom am NAP in zwei Zustände ( $\underline{I}_{NAP-I}$ und $\underline{I}_{NAP-II}$ )	Spannung am NAP in zwei Zustände ( $\underline{U}_{NAP-I}$ und $\underline{U}_{NAP-II}$ ), Strom am NAP in zwei Zustände ( $\underline{I}_{NAP-I}$ und $\underline{I}_{NAP-II}$ )
Aussagen	Identifizierung der dominanten Oberschwingungsspannungsquelle	Identifizierung der dominanten Oberschwingungsstromquelle
Indikator	$\underline{(U/I)}_{NAP-II} - \underline{(U/I)}_{NAP-I}$	$\underline{(I/U)}_{NAP-II} - \underline{(I/U)}_{NAP-I}$
Extremfall I	$\frac{\underline{U}_{Netz}}{\underline{U}_{Ans}} \rightarrow \infty \Rightarrow \underline{(U/I)}_{NAP-II} - \underline{(U/I)}_{NAP-I} \rightarrow 0$	$\frac{\underline{I}_{Netz}}{\underline{I}_{Ans}} \rightarrow \infty \Rightarrow \underline{(I/U)}_{NAP-II} - \underline{(I/U)}_{NAP-I} \rightarrow 0$
Extremfall II	$\frac{\underline{U}_{Netz}}{\underline{U}_{Ans}} \rightarrow 0 \Rightarrow \underline{(U/I)}_{NAP-II} - \underline{(U/I)}_{NAP-I} \rightarrow 0$	$\frac{\underline{I}_{Netz}}{\underline{I}_{Ans}} \rightarrow 0 \Rightarrow \underline{(I/U)}_{NAP-II} - \underline{(I/U)}_{NAP-I} \rightarrow 0$

Aus den Extremfällen I und II werden zwei Gruppen von Hilfslinien für den „Spannung-Strom-Verhältnis“-Ansatz bzw. den „Strom-Spannung-Verhältnis“-Ansatz extrahiert, anhand deren sich die  $\left(\frac{U}{I}\right)_{\text{NAP-II}} - \left(\frac{U}{I}\right)_{\text{NAP-I}}$  bzw.  $\left(\frac{I}{U}\right)_{\text{NAP-II}} - \left(\frac{I}{U}\right)_{\text{NAP-I}}$  interpretieren lassen. Die Hilfslinien sind beispielhaft anhand exemplarischer Anschlussnehmer- und Netz-Impedanzen in Abb. 3 für die beiden Ansätze veranschaulicht.

In Abb. 3 (a) können nun Aussagen sowohl bezüglich des Betrags der „Ersatzspannungsquellen“ der Anschlussnehmer- und Netzseite als auch bezüglich der Phasenwinkeldifferenz zwischen diesen Quellen getroffen werden. Mithilfe der Abb. 3 (b) können nun Aussagen sowohl bezüglich des Betrags der „Ersatzstromquellen“ der Anschlussnehmer- und Netzseite als auch bezüglich der Phasenwinkeldifferenz zwischen diesen Quellen getroffen werden.



(a) Erste und zweite Gruppe der Hilfslinien zur Analyse des Verhältnisses der Ersatzspannungen (blaue Linien:  $\left|\frac{U_{\text{Netz}}}{U_{\text{Ans}}}\right| = k$ , gestrichelte rote Linien:  $\arg\left(\frac{U_{\text{Netz}}}{U_{\text{Ans}}}\right) = k$ , grüne Punkte:  $\left(\frac{U}{I}\right)_{\text{NAP-II}} - \left(\frac{U}{I}\right)_{\text{NAP-I}}$ ).

(b) Erste und zweite Gruppe der Hilfslinien zur Analyse des Verhältnisses der Ersatzströme (blaue Linien:  $\left|\frac{I_{\text{Netz}}}{I_{\text{Ans}}}\right| = k$ , gestrichelte rote Linien:  $\arg\left(\frac{I_{\text{Netz}}}{I_{\text{Ans}}}\right) = k$ , grüne Punkte:  $\left(\frac{I}{U}\right)_{\text{NAP-II}} - \left(\frac{I}{U}\right)_{\text{NAP-I}}$ ).

Abb.3: Ansätze zur Identifizierung der dominanten Oberschwingungsquelle

Für die Identifizierung der dominanten Ersatzspannung sollte die Position der Differenzen der Spannung-Strom-Verhältnisse in zwei Zustände mit 0 und  $Z_{\text{Ser}}$  verglichen werden:

$$\left| \left(\frac{U}{I}\right)_{\text{NAP-II}} - \left(\frac{U}{I}\right)_{\text{NAP-I}} \right| < \left| \left(\frac{U}{I}\right)_{\text{NAP-II}} - \left(\frac{U}{I}\right)_{\text{NAP-I}} - Z_{\text{Ser}} \right| \Rightarrow \text{Ersatzspannungsquelle der Netzseite ist dominant.}$$

$\left| \left( \frac{U}{I} \right)_{\text{NAP-II}} - \left( \frac{U}{I} \right)_{\text{NAP-I}} \right| > \left| \left( \frac{U}{I} \right)_{\text{NAP-II}} - \left( \frac{U}{I} \right)_{\text{NAP-I}} - \underline{Z}_{\text{Ser}} \right| \Rightarrow$  Ersatzspannungsquelle der Anschluss-nehmerseite ist dominant.

Für die Identifizierung des dominanten Ersatzstroms sollte die Position der Differenzen der Strom-Spannungs-Verhältnisse in zwei Zustände mit 0 und  $\underline{Y}_{\text{Par}}$  verglichen werden:

$\left| \left( \frac{I}{U} \right)_{\text{NAP-II}} - \left( \frac{I}{U} \right)_{\text{NAP-I}} \right| < \left| \left( \frac{I}{U} \right)_{\text{NAP-II}} - \left( \frac{I}{U} \right)_{\text{NAP-I}} - \underline{Y}_{\text{Par}} \right| \Rightarrow$  Ersatzstromquelle der Netzseite ist dominant.

$\left| \left( \frac{I}{U} \right)_{\text{NAP-II}} - \left( \frac{I}{U} \right)_{\text{NAP-I}} \right| > \left| \left( \frac{I}{U} \right)_{\text{NAP-II}} - \left( \frac{I}{U} \right)_{\text{NAP-I}} - \underline{Y}_{\text{Par}} \right| \Rightarrow$  Ersatzstromquelle der Anschluss-nehmerseite ist dominant.

- [1] K. Malekian, "A novel approach to analyze the harmonic behavior of customers at the point of common coupling," *Compatibility and Power Electronics (CPE)*, 9th International Conference on, pp. 31–36, June 2015.
- [2] F. Safargholi, K. Malekian, and W. Schufft, "On the Dominant Harmonic Source Identification—Part I: Review of Methods," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 33, no. 3, pp. 1268-1277, June 2018.
- [3] F. Safargholi, K. Malekian, and W. Schufft, "On the Dominant Harmonic Source Identification—Part II: Application and Interpretation of Methods," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 33, no. 3, pp. 1278-1287, June 2018.
- [4] F. Safargholi "Spannung-Strom-Verhältnis-Ansatz mit einer Längsimpedanz bzw. Queradmittanz für die Identifizierung der dominanten Oberschwingungsquelle," Doktorandenseminar, TU-Chemnitz 2018.

## 5 Abgeschlossene wissenschaftliche Arbeiten

Auch im Jahr 2018 konnten an unserer Professur viele Studierende bei deren Studienabschluss positiv unterstützt und begleitet werden. Nachfolgend sind die Themen dieser Abschlussarbeiten aufgeführt. Detailliertere Informationen und Hinweise zu allen wissenschaftlichen Arbeiten können auf unserer Homepage eingesehen werden:

<http://www.tu-chemnitz.de/etit/eneho/lehre/studentischarbeiten.php>

Wir wünschen allen Absolventen für Ihre Zukunft viel Zufriedenheit und großen Erfolg!

### 5.1 Masterarbeiten

Del Collado Garcia, Samuel	Technische Untersuchung zur Netzeinbindung und Schwarzstartfähigkeit mittels Batteriegroßspeicher eines Motorheizkraftwerkes (BHKW) und Sicherstellung der Eigenbedarfsversorgung des Heizkraftwerks Chemnitz
Isert, Alexander	Messung und Vergleich von Vorentladungsströmen zwischen standardisierter und nicht-standardisierter, oszillierender Blitzspannung bei einer Spitze-Platte-Elektrodenanordnung
Lozic, Josip	Entwicklung und Simulation einer Steuerung eines stationären Batterispeichers im Kontext der Ladeunterstützung für Carsharing-Systeme
Neumann, Max	Energetische und Ökonomische Bewertung eines Blockheizkraftwerkes in Kombination mit solarer Energiebereitstellung und Speichernutzung am Beispiel der Schwimmhalle Atlantis
Poller, Linda	Entwicklung eines ökonomisch nachhaltigen Ertragsmodells für die Bereitstellung und den Betrieb der Ladeinfrastruktur der DREWAG – Stadtwerke Dresden GmbH für Elektrofahrzeuge
Starke, Ludwig	Energiewende – Entwicklung neuer Geschäftsmodelle für Energieversorger
Teich, Daniel	Risikomanagement bei Photovoltaik Anlagen – Risikoidentifikation, Risikobewertung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für Investitionen in Photovoltaikanlagen mittels Discounted Cash Flow - Methode
Welsch, Stefan	Netzanalyse eines Hochspannungsnetzes mit stationären und zeitlich schwankenden Leistungsflüssen

Wintergerst, Sebastian	Statistische Auswertung der Oberschwingungsvorbelastung im Mittelspannungsnetz anhand von Messdaten
Zorn, Eric	Untersuchung der Umsetzbarkeit einer Sharing Economy Onlineplattform in der Energiebranche

## 5.2 Bachelorarbeiten

Butter, Jenny	Untersuchung des Einflusses des Eigenverbrauchs einer Windenergieanlage auf ihr Oberschwingungsverhalten anhand von Vor-Ort-Messungen
Börner, Dana	Entwicklung einer intelligenten Ladesteuerung für Elektrofahrzeuge in einem Mobility-On-Demand-Konzept unter der Nutzung lokaler regenerativer Energien
Görschel, Jakob	Ermittlung des stochastischen Durchschlagverhaltens an einer Spitze-Spitze Elektrodenanordnung bei nicht-standardisierter, oszillierender Blitzspannung
Langer, Julia	Wirtschaftliche Bewertung eines dezentralen Elektroenergiespeichers zum vorwiegend regenerativen Laden von Elektrofahrzeugen
Lentzsch, Tobias	Implementierung und Erprobung einer Schnittstelle zur interaktiven Eingabe von Netzdaten in MATPOWER
Zwinzscher, Maria	Einsatzmöglichkeiten neuer Technologien zur Spannungshaltung in Niederspannungsnetzen

## 6 Veröffentlichungen und Konferenzbeiträge

Die im Jahr 2018 getätigten Veröffentlichungen und Konferenzbeiträge sind nachfolgend sowie auf unserer Homepage aufgeführt.

**Kaatz, G.; Meyer, M. F.; Grumm, F.; Schulz, D.; Safargholi, F.; Hoven, M.; Adloff, S.:** *Impedance Frequency Modelling based on Grid Data for the Prediction of Harmonic Voltages*. NEIS conference, Hamburg, 2018.

**Jacob, L., Reinoehl, S., Schufft, W.:** *„Investigation of Technical Potentials for Load Shifting and Their Suitability to Compensate Forecast Errors of Wind Parks“*, ENERGY 2018: The 8<sup>th</sup> International Conference on Smart Grids, Green Communications and IT Energy-aware Technologies, Mai 2018.

**Hoshmeh, A.; Schmidt, U.; Gürlek, A.:** *Investigations on the Developed Full Frequency- Dependent Cable Model for Calculations of Fast Transients*, Energies 2018, September 2018.

**Hoshmeh, A.; Schmidt, U.; Gürlek, A.; Schufft, W.:** *Kabelmodellierung durch den Einsatz komplexer Pi-Ersatzschaltbilder*, ETG Journal 2, August 2018.

**Domagk, M.; Safargholi, F.; Hoven, M.:** *Netzweite Oberschwingungssimulation in exemplarischen Netzen*. Abschlussworkshop NetzHarmonie, Berlin, 11. - 12. September 2018.

**Safargholi, F.:** *Spannung-Strom-Verhältnis-Ansatz zur Identifizierung der dominanten Oberschwingungsquelle*. Abschlussworkshop NetzHarmonie, Berlin, 11. - 12. September 2018.

**Safargholi, F.:** *Neue Ansätze und verbesserte Bewertungsverfahren hinsichtlich der Oberschwingungsgrenzwertberechnung für die Erzeugungs- und Abnehmeranlagen in Mittelspannung*. Abschlussworkshop NetzHarmonie, Berlin, 11. - 12. September 2018.

**Safargholi, F.:** *Oberschwingungsmodellvalidierung von Erzeugungseinheiten*. Abschlussworkshop NetzHarmonie, Berlin, 11. - 12. September 2018.

**Safargholi, F.:** *Oberschwingungsmodellbildung von Erzeugungsanlage–Gleichzeitigkeit*. Abschlussworkshop NetzHarmonie, Berlin, 11. - 12. September 2018.

**Gürlek, A.; Shirvani, A.; Hoshmeh, A.; Schufft, W.:** *Stochastische Beschreibung des Durchschlagverhaltens für die Spitze-Spitze-Elektrodenanordnung bei Blitzspannung*, VDE-Hochspannungstechnik 2018, VDE-Verlag GmbH Berlin-Offenbach, Berlin, 12. - 14. November 2018.

**Jacob, K.; Schufft, W.:** Einfluss fluktuierender Ströme auf das Alterungsverhalten von Mittelspannungs-Kabelmuffen durch Teilentladungen, ETG Hochspannungstechnik 2018, Berlin, 12. - 14. November, 2018.

**Szilágyi, R.; Hadid, S.; Schufft, W.:** Klassifikation von Mittelspannungs-Kabelmuffen anhand frequenzabhängiger Verlustfaktormessung, ETG Hochspannungstechnik 2018, Berlin, 12. - 14. November 2018.

**Jacob, L., Teuscher J., Schufft, W.:** *„Erweiterte Optimal Power Flow – Berechnung zur Abbildung des Netzbetriebes auf Basis von erzeuger- und verbraucherseitigen Flexibilitäten in Verteilnetzen“*, Posterbeitrag, ETG-CIRED-Workshop 2018, VDE Tec Summit, Berlin, 13. - 14. November 2018.

## 7 Externe Aktivitäten und Kontakte

### 7.1 Teilnahmen an Konferenzen, Tagungen, Kolloquien

Datum	Person	Veranstaltung	Ort
24.01.2018	Dr. J. Teuscher	VDE- Workshop Zellularer Ansatz	Nürnberg
28.02. - 02.03.2018	B. Jacobsen	UFGC18 – Urban Future Global Conference 2018	Wien
05.03.2018	L. Jacob	ISINA – Interdisziplinäres Symposium für Frauen im MINT-Bereich	Chemnitz
22.03.2018	K. Jacob	VDE-Fachtagung: "Digitalisierung in MS- Schaltanlagen und -netzen"	Spremberg
22.03.2018	L. Jacob	VDE-Fachtagung: "Digitalisierung in MS- Schaltanlagen und -netzen"	Spremberg
23.04.2018	B. Jacobsen	Konferenz für regionales Energiemanagement	Dresden
26.04.2018	K. Jacob	Hannover Messe	Hannover
26.04.2018	L. Jacob	Hannover Messe	Hannover
20 - 24.05.2018	L. Jacob	ENERGY 18	Nizza
19. - 20.06.2018	B. Jacobsen	Energy Systems Conference	London
26. - 31.08. 2018	Prof. W. Schufft	CIGRE SESSION 47	Paris
26. - 31.08. 2018	A. Gürlek	CIGRE SESSION 47	Paris
26. - 31.08. 2018	Dr. A. Hoshmeh	CIGRE SESSION 47	Paris
26. - 31.08. 2018	Dr. J. Teuscher	CIGRE SESSION 47	Paris
11. - 12.09. 2018	F. Safargholi	Abschlussworkshop NetzHarmonie	Berlin
7.11.2018	Dr. J. Teuscher	CERBERUS-Anwendertreffen	Chemnitz

12.-14.11.2018	A. Gürlek	VDE-Hochspannungstechnik 2018	Berlin
12.-14.11.2018	K. Jacob	VDE-Hochspannungstechnik 2018	Berlin
13.-14.11.2018	L. Jacob	VDE Tec Summit 2018	Berlin
11.12.2018	L. Jacob	new energy world	Leipzig
11.12.2018	B. Jacobsen	new energy world	Leipzig

## 7.2 Gäste an der Professur

Datum	Namen	Firma/ Institution
11.01.2018	Hr. Dr. Werner	DNV GL
11.01.2018	Hr. Dr. Frenzel	DNV GL
12.01.2018	Hr. Prof. Großmann	Hochschule Zittau/Görlitz
12.01.2018	Hr. Prof. Valtin	HTWK Leipzig
12.01.2018	Hr. Prof. Hofmann	HTW Dresden
25.01.2018	Hr. Böhnke	Hörburger AG
25.01.2018	Hr. Hähle	Hörburger AG
06.04.2018	Hr. Dr. Menesklou	KIT, Karlsruhe
05.06.2018	Fr. Paar	VSWG – Verband Sächsischer Wohnungsgenossenschaften e.V.
05.06.2018	Hr. Winkler	VSWG – Verband Sächsischer Wohnungsgenossenschaften e.V.
11.06.2018	Hr. Prof. Kornhuber	Hochschule Zittau/Görlitz
23.07.2018	Hr. Dr. Demmig	Stromnetz Berlin GmbH
23.07.2018	Hr. Prof. Dr. Kizilcay	Universität Siegen
23.07.2018	Hr. Prof. Dr. Schmidt	Hochschule Zittau/Görlitz
06.09.2018	Hr. Dr. Barucki	Adapted Solutions
28.09.2018	Hr. Dr. Malekian	WRD GmbH
02.10.2018	Hr. Dr. Götz	Stadtwerke Annaberg-Buchholz
01.11.2018	Hr. Dähne	imc Meßsysteme GmbH
27.11.2018	Hr. Dahm	Mahle Behr GmbH
29.11.2018	Hr. Amann	SPIE SAG
29.11.2018	Hr. Krätzer	SPIE SAG
03.12.2018	Hr. Dietrich	Dometic GmbH, Siegen
03.12.2018	Hr. Rimmel	Dometic GmbH, Siegen

## 8 Höhepunkte

### 8.1 Lange Nacht der Wissenschaften am 05.05.2018

Am 05. Mai dieses Jahres wurde zum zweiten Mal der Tag der Universität durchgeführt. Mit einem bunten Programm wurden die Türen der Universität für alle Interessierten geöffnet. Von 18 Uhr bis 1 Uhr nachts wurde dabei im Rahmen der Langen Nacht der Wissenschaften auch unser Hochspannungslabor gezeigt. Mit Führungen im 30-Minuten-Takt wurde die Laborführung zahlreich besucht. Über 500 Interessierte staunten u.a. über die Jakobsleiter, Gleitentladungen an einer Durchführung oder über den „Ionenwind-Motor“ und konnten Wissenswertes über unser aktuelles Elektroenergiesystem erfahren. Aufgrund der großen Nachfrage wird es 2019 wahrscheinlich ebenfalls wieder zu einer solchen Veranstaltung kommen.



## 8.2 Start des Projektes UNDYNE am 01.06.2018

Das Ziel des Projektes ist die Entwicklung und Implementierung eines Algorithmus zur Simulation physikalischer Größen von Betriebsmitteln (Spannung, Strom, Energie-Inhalt von Speichern, Temperaturen, usw.) über größere Zeiträume. Dieser Bedarf resultiert aus vielfältigen Entwicklungen, wie zum Beispiel der Energiewende. Während bisher häufig eine stationäre „Moment-Aufnahme“ eines elektrischen Netzes ausreichend war, fordert der Einsatz von Steuerungen, Regelungen und Energiespeichern eine Betrachtung der elektrischen Größen über einen längeren Zeitraum, der sich von Minuten, Stunden, Tage oder sogar Wochen bis hin zu Monate erstrecken kann. Ein offensichtliches Beispiel hierfür ist das für die flächendeckende Verbreitung der Elektromobilität benötigte Lade-Management, welches eine Vielzahl dynamischer Größen, sowie integraler Werte, wie zum Beispiel der Ladezustand der Batterien, besitzt.

Bisherige Berechnungs-Ansätze sind mit großen Schwierigkeiten verbunden, da die verwendeten Zeitskalen extrem unterschiedlich sind. Während das Wechsel- bzw. Drehstromnetz einen sinusförmigen Zeitverlauf mit einer Periodendauer von 20 Millisekunden aufweist, können Ladevorgänge mehrere Stunden in Anspruch nehmen. Thermische und mechanische Zeitkonstanten können ebenfalls im Minuten- oder sogar Stundenbereich liegen. Eine detaillierte Berechnung über einen großen Zeitraum mit einer Auflösung der Rechenschritte im Millisekunden-Bereich ist aufgrund der langen Rechenzeiten und der Größe der anfallenden Daten nicht praktikabel.

Ziel des Projektes UNDYNE ist die Umsetzung eines Algorithmus, der mittels einer zweifachen Transformation der Systemgleichungen die Anzahl der notwendigen Rechenschritte signifikant verringern kann. Mit einer Kombination aus der Berechnung von genauen transienten Vorgängen und der schnellen Berechnung größerer Zeitabschnitte soll eine numerische Plattform für die Simulation unterschiedlicher Systeme geschaffen werden. Wesentliche Vorteile sind überall da zu erwarten, wo die Zeitkonstanten der Systeme bzw. Regelungen oberhalb der aus der Netzfrequenz gegebenen Periodendauer liegen.

Im ersten halben Projektjahr stand vor allem die Recherche und die Untersuchung des bisherigen Ansatzes mit getroffenen Annahmen im Vordergrund. Von Interesse waren insbesondere die Frequenzabhängigkeit von Rückleitungsimpedanzen und ein möglicher Fehler in der Simulation, mittels symmetrischer Komponenten bei zweiseitiger Einspeisung. Zudem wurden Ladevorgänge von Elektrofahrzeugen transient gemessen, da es bisher keine veröffentlichten, relevanten Messungen für Elektrofahrzeuge gab. Aus diesen Daten kann im Laufe des Projektes ein, für Elektrofahrzeuge gültiges, transientes Lastmodell definiert werden.

### 8.3 Fachexkursion der Professur in den Bergbau-Technikpark Großpösna am 15.06.2018

In guter alter Tradition fand auch in diesem Jahr eine Fachexkursion der Professur statt. Am 15.06. besichtigten wir den Bergbau-Technikpark Großpösna im Leipziger Braunkohlerevier. Uns wurde dabei ein detaillierter Einblick in den Tagebaubetrieb bei der Förderung der Braunkohle gegeben. Neben der Vorstellung der sehr großen Förderbaggeranlagen wurde uns zudem der Abtransport im eigenen Bahnnetz sowie die Eigenbedarfsdeckung erklärt. Nach diesem fachlichen Teil wurde uns im Rahmen einer Radtour um den Markleeberger und den Störmthaler See deutlich, welche großen Auswirkungen der Braunkohleabbau für die Umwelt bedeutet und mit welchem hohem Aufwand die ehemaligen Abbaugelände wieder rekultiviert werden. Alles in allem war dies wiederum ein sehr lehrreicher und zugleich unterhaltsamer Ausflug.



#### 8.4 Promotionsverteidigung Dr. Abdullah Hoshmeh 23.07.2018

„Entwicklung eines frequenzabhängigen Kabelmodells  
Unter Verwendung einer komplexen  $\Pi$ -Ersatzanordnung“

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schufft  
Prof. Dr.-Ing. Mustafa Kizilcay

Beisitzer: Prof. Dr.-Ing. Uwe Schmidt  
Dr.-Ing. Sven Demmig

In seiner Dissertation beschäftigte sich Herr Dr.-Ing. Hoshmeh mit der Modellierung von Kabeln. Kabel sind ein wichtiger Bestandteil des Elektroenergiesystems. Für die Kenntnis des Verhaltens von Kabeln sind Modelle erforderlich, die ihr Verhalten im stationären Zustand und bei transienten Vorgängen hinreichend genau abbilden können. Eine Methode zur Modellierung von Kabeln basiert auf konzentrierten Parametern. Hierbei wird das Kabel durch eine Ersatzanordnung, in der Regel durch eine Kaskade von  $\Pi$ -Gliedern, modelliert. Das Prinzip dieser Modelle ist relativ einfach. Allerdings vernachlässigt das bisher verwendete  $\Pi$ -Glieder-Kabelmodell die Frequenzabhängigkeit der Kabelparameter. Deshalb wird dieses Modell nur im stationären Zustand verwendet. In der Dissertation von Herrn Dr.-Ing. Hoshmeh erfolgte die Entwicklung eines auf  $\Pi$ -Gliedern basierenden Kabelmodells, mit dem der stationäre Zustand und die transienten Vorgänge beschrieben werden können. Dabei wurde der Einfluss unterschiedlicher Faktoren auf die Resultate des neu entwickelten Kabelmodells sowohl im Frequenz- als auch im Zeitbereich ausführlich untersucht.



Wir gratulieren Herrn Dr.-Ing. Hoshmeh herzlich und wünschen ihm eine glückliche und erfolgreiche Zukunft!

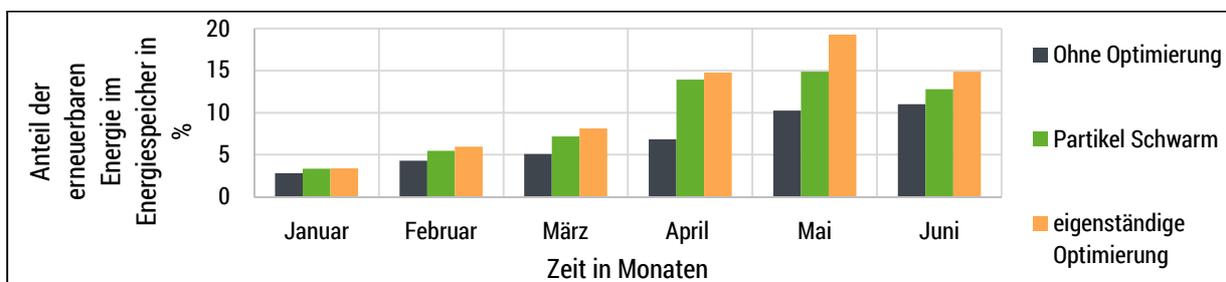
### 8.5 Erfolgreicher Abschluss des ESF-geförderten Projektes EcoMobility am 31.08.2018

Die Laufzeit des Projektes „ECoMobility – Connected E-Mobility – Vernetzte Elektromobilität am Beispiel der TU Chemnitz“ der Technischen Universität Chemnitz endete zum 31. August 2018. Das Team präsentierte zu diesem Anlass im Alten Heizhaus der TU Chemnitz im Rahmen eines Abschluss Symposiums ausgewählte Projektinhalte und Ergebnisse. Zusätzlich gaben externe Referentinnen und Referenten Einblicke in universitätsexterne Forschungs- und Praxisprojekte.

Das Projekt „ECoMobility“ wurde durch den Europäischen Sozialfonds (ESF) gefördert. Ziel des Projektes war es, ein nachhaltiges Mobilitätskonzept für kurze und mittlere Dienstwege am Beispiel der TU Chemnitz umzusetzen, zu evaluieren und zu optimieren. Insgesamt sechs Nachwuchswissenschaftlerinnen und –wissenschaftler forschten daran seit 2015. Neben technischen Aspekten wurde auch das Verhalten der Nutzerinnen und Nutzer erforscht.

Seit Oktober 2016 nutzten fast 250 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter mit insgesamt 2.400 Buchungen das vernetzte Mobilitätsangebot mit verschiedenen Verkehrsträgern von ECoMobility und legten so über 24.000 Kilometer per Elektroauto und 7.000 Kilometer via Pedelec zurück. Durch die Nutzung der E-Autos konnten über 40 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber von Fahrten mit Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor vermieden werden.

Die Professur für Energie- und Hochspannungstechnik unterstützte das Projekt mit dem Schwerpunkt Ecological. Die Arbeiten fokussierten sich auf das Laden der Elektrofahrzeuge mit einem möglichst hohen Anteil von regenerativ bereitgestellter Elektroenergie. Es wurden Untersuchungen zur Verbesserung des Lademanagements mit Optimierung der Ladezeiten der Fahrzeuge durchgeführt. In einem weiteren Schwerpunkt wurde zudem der Einsatz eines stationären Elektroenergiespeichersystems in diesem Kontext untersucht. Zur Erhöhung des Anteils regenerativer Energie an der Ladeenergie wurden zwei Optimierungsansätze entwickelt. Ein Ansatz basiert auf der Partikel-Schwarm-Optimierung (PSO). Ein weiterer eigenständiger alternativer Optimierungsalgorithmus (ALT) wurde auf Basis eines Parametervergleichs entwickelt. Mit diesen Ansätzen konnte der durchschnittliche Anteil der erneuerbaren Energien im Energiespeicher von 6,6 % auf 9,7 % (PSO-Methode) bzw. 11,1 % (ALT) gesteigert werden, wie die folgende Abbildung zeigt.



## 8.6 Erfolgreicher Abschluss des Projektes NetzHarmonie am 11. und 12.09.2018

Am 11. und 12. September wurden die Ergebnisse des Verbundforschungsprojekts „NetzHarmonie“ (gefördert von BMWi/BMBF, FKZ: 0325757A-L) im Workshop „Netzverträgliche Integration von Erzeugungsanlagen aus Oberschwingungssicht im Verteilnetz“ vorgestellt.

Die Projektpartner haben umfangreiche Messkampagnen in Wind- und PV-Parks sowie Netzen durchgeführt. Sie haben die Überlagerungsmechanismen der Oberschwingungen von mehreren Erzeugungseinheiten analysiert. Unter Nutzung der Erzeugungseinheit-Modelle von Herstellern und der Messdatenbasis wurde ein neuer Validierungsprozess für Erzeugungseinheit-Modelle erstellt. Detaillierte Simulationen von Erzeugungsanlagen und Netzen wurden kreiert, um zukünftige Szenarien bei der Netz - und Anlagenplanung realistisch abzubilden.

Die TU-Chemnitz hat hauptsächlich die für die Modellierung der Erzeugungseinheiten und -anlagen relevanten Aspekte untersucht. Aufgrund der Erfahrungen/Vorarbeiten wurde auch die Leitung von AP3 (mit Fokus auf der Modellvalidierung der Erzeugungseinheiten und Modellierung der Erzeugungsanlagen) des Projekts an die TU Chemnitz übertragen. Farhad Safargholi hat beim Workshop vor mehr als 70 Teilnehmern aus Industrie und Forschung über die Ergebnisse des Projekts berichtet.

## 8.7 Weihnachtsfeier am 6. Dezember 2018

Zum Abschluss eines erfolgreichen Jahres, so hat es Tradition, trafen wir uns in der Vorweihnachtszeit zur alljährlichen Weihnachtsfeier. Leider mussten wir auch in diesem Jahr auf die winterliche Stimmung verzichten. Das „Forsthaus Grüna“ konnte allerdings mit zur Jahreszeit passender Dekoration trotzdem für eine angemessene Stimmung bei dem gemütlichen Beisammensein, mit allen Kollegen und Ehrengästen der Professur, sorgen. Trotz einiger organisatorischer Probleme bei der à-la-carte-Bestellung entwickelten sich interessante Gespräche. Einstimmig wurde auf die geplante Bowling-Runde verzichtet, um die gesellige Atmosphäre beizubehalten. Wir blicken somit auch 2018 auf einen schönen Abend zurück, der allen mit Freude in Erinnerung bleiben wird.



## 9 Ausstattung für Praktika und Prüfungen in der Hochspannungstechnik

Prüfsystem zur Erzeugung von Gleich-, Wechsel- und Stoßspannungen bis 100 kV



Praktikumsversuche:

- *Funkenstrecken*
- *Erzeugung und Messung hoher Gleich- und Wechselspannungen*

Prüfsystem zur Erzeugung von Wechselspannungen bis 200 kV



Praktikumsversuch:

- *Isolatoren*

### Geschirmte Messkabine zur Teilentladungs- und Verlustfaktormessung



Praktikumsversuch:

- *Verlustfaktormessung ( $\tan \delta$ )*

### Stoßspannungsgenerator zur Erzeugung von Blitzstoß- und Schaltstoßspannungen bis 600 kV



Praktikumsversuch:

- *Erzeugen von Stoßspannungen / Einfluss der Elemente des Stoßspannungsgenerators*

Wechselspannungs-Prüfsystem zur Erzeugung von Wechselspannungen bis 200 kV



Mobiles Resonanzprüfsystem zur Teilentladungs- und Verlustfaktormessung und Spannungsprüfung



# 10 Laborausstattung

## Verfügbare Hardware

### Hochspannungsprüfung

Wechselspannung	$U_{\max} = 200 \text{ kV}$
Gleichspannung	$U_{\max} = 140 \text{ kV}$
Stoßspannung	$U_{\max} = 600 \text{ kV}$

### Trennverstärker

Lichtwellenleiter-Isolier-Messsystem HERO® LINK LWL-DC-15 MHz für Messungen auf Mittelspannungspotential

### Vor-Ort-Resonanzprüfsystem

Prüfspannung bis 36 kV, Prüfstrom bis 10 A  
Frequenzbereich 25 - 300 Hz

### Transienten-Mess-System für Impulsspannungsmessung

TR-AS 100/12, 100 Megasample pro s, 12 bit  
TR-AS 100/8 100 Megasample pro s, 8 bit  
umfangreiche Auswerte- und Protokollsoftware

### Digitales Kapazitäts- und Verlustfaktormesssystem MI 600 (Omicron)

Auflösung  $\tan \delta$  bis  $10^{-8}$   
Messbereich Kapazität 0,1 pF - 5  $\mu\text{F}$   
Frequenzbereich 5 Hz - 50 kHz

### Verlustfaktormessung DIRANA – Dielectric Response Analyser (Omicron)

Frequenzbereichsspektroskopie (FDS)  
Messung von Polarisations-/Depolarisationsströmen (PDC)

### Digitales Teilentladungsmess- und Diagnosesystem MPD 600 (Omicron)

TE-Messbereich 1 -  $10^5$  pC  
obere Grenzfrequenz 30 MHz

### TE-Fehlstellenortung mit MPD 600 (Omicron)

Abtastrate bis 250 Megasample pro s  
Ortungsgenauigkeit bis 0,2 % der Kabellänge

### Kabeldiagnosesystem CDS

dreiphasige IRC-Analyse an PE- und VPE-Kabeln  
dreiphasige RVM-Analyse an Papier-Masse-Kabeln

Transportables Hochspannungsnetzgerät 6,5 kV/ 0,02 ABlitzspannungsprüfeinrichtung SIP 010, transportabel

Wechselspannung bis 5 kV

Stoßspannung 1,2/50 µs bis 10 kV

Spannungsmessteiler

Ohm'sche Teiler bis 200 kV

Kapazitive Teiler bis 300 kV

Stoßspannungsteiler bis 600 kV (1,2/50 µs)

Mikrotom - Schneidgerät für Untersuchung von Wasserbäumchen (water trees) an PE-KabelnTransienten Recorder DEWE-3020

8-Kanal Recorder und 8 Kanäle Erweiterung

Abtastrate 200 KSa/s

Auflösung 24 bit

Transienten Recorder YOKOGAWA DL 708

8-Kanal Scope Recorder

Abtastrate bis 10 MSa/s

Auflösung 10 bit

Digitalspeicher Oszilloskope YOKOGAWA DL9040L und Rohde & Schwarz RTM2054

4 Kanäle

Abtastrate bis 5 GSa/s

Bandbreite 500 MHz

Auflösung 8 bit / 16 bit im High-Resolution Mode

Datenlogger DA 100 (YOKOGAWA) mit 10 Kanälen

kürzestes Messintervall: 2 s

Speichertiefe: nur begrenzt durch Festplatte des Logger-PC

Lichtmikroskop mit Rechneranschluss und VideoeinrichtungMagnetfeldmesseinrichtung mit Rechneranschluss bis 10 kHzDosisleistungsmessgerät FH 40 G (Eberline Instruments)

Messgröße: Photonendosisleistung

Messbereich: 0,1 µSv/h - 0,99 Sv/h

Dosismessbereich: 100 nSv - 10 Sv

EM-Feldanalysator EFA-2 (Wandel & Goltermann)

Frequenzbereich 1: 5 Hz ... 2 kHz

Frequenzbereich 2: 5 Hz ... 30 kHz

Messbereich: 100 nT, 1  $\mu$ T, 10  $\mu$ T, 100  $\mu$ T, 1 mT, 10 mT  
(automatische Messbereichswahl)

Strahlungsmessgerät EMR-20 (Wandel & Goltermann) für isotrope Messung elektrischer Felder

Frequenzbereich: 100 kHz ... 3 GHz

Messprinzip: digitale dreiachsige Messung

Spezifizierter Messbereich: 1 ... 800 V/m

Anzeigeauflösung: 0,01 V/m

Hochstromaggregat ODEN

1000A/ 2,5V TAP 2,5 (Wandlerprüfung)

Gleichspannungsnetzgerät Toellner 8872

40V/ 100A

## Verfügbare Software

### MATLAB

Programmpaket zur Analyse von Daten, Durchführung von Simulationen und Programmierung.

### ATP/EMTP

Simulation dynamischer und transienter Netzvorgänge der Energieversorgung.

### EMTDC/PSCAD

Simulation dynamischer und transienter Netzvorgänge mit leistungselektronischen Betriebsmitteln in Elektroenergiesystemen.

### DigSILENT „POWERFACTORY 2016“ und Elektra 3.98

Stationäre Berechnung und Simulation von Lastflüssen und Kurzschlüssen in elektrischen Netzen.

### FlexPro 10

Konvertierung, Bearbeitung und Analyse von Messwertdatensätzen.

### VIG 2011

Virtueller Impulsgenerator zur Simulation von Stoßspannungsimpulsen im Internet unter:

<http://www.tu-chemnitz.de/etit/eneho/service/vig/vig2011/index.php?c=vig2011>

# 11 Dienstleistungsangebote

## 11.1 Dielektrische Prüfungen

- Wechselspannungsprüfungen bis 200 kV
- Stoßspannungsprüfungen bis 600 kV
- Gleichspannungsprüfungen bis 140 kV
- FGH-Stufentest an Mittelspannungskabeln bis 150 kV
- Vor-Ort-Spannungsprüfungen an Mittelspannungskabeln und anderen kapazitiven Prüfobjekten mit einem mobilen Resonanzprüfsystem

## 11.2 Diagnosemöglichkeiten

- Verlustfaktormessungen mit unterschiedlichen Messprinzipien im Labor
- Verlustfaktormessungen Vor-Ort mit einem mobilen Resonanzprüfsystem
- Teilentladungsmessungen mit unterschiedlichen Messprinzipien im Labor
- Verlustfaktormessung Vor-Ort mit einem mobilen Resonanzprüfsystem
- Isotherme Relaxationsstrom-Analyse (IRC) an Energiekabeln
- Messungen von Isolations- und Ableitwiderständen

## 11.3 Prüfung der Stromtragfähigkeit

Widerstandsmessungen von Hauptstrombahnen

Hochstromprüfungen, Erwärmungsprüfungen bis 2.000 A (größere Ströme auf Anfrage) für:

- Leiteranordnungen
- Geräte
- Schaltfelder

#### 11.4 Spezielle Messaufgaben

- Messung magn. Felder (5 Hz bis 30 kHz [3 dB]; MB: 100 nT, 1  $\mu$ T, 10  $\mu$ T, 100  $\mu$ T, 1 mT, 10 mT)
- Messung elektrischer Felder (100 kHz bis 3 GHz; MB: 1 bis 800 V/m – 0,0027 bis 1700 W/m<sup>2</sup>)
- Messung elektromagnetischer Felder
- Messungen mit Isoliermessverstärkern
- Mikroschnitte von PE-Kabeln zum Nachweis von Wasserbäumchen (water trees)

#### 11.5 Virtueller Stoßspannungsgenerator

Zur Simulation des Einflusses der Elemente des Stoßkreises auf den Spannungsverlauf.

<http://www.tu-chemnitz.de/etit/eneho/service/vig/vig2011/index.php?c=vig2011>

#### 11.6 Netzanalysen

- Lastfluss-, Lastgang- und Leitungsfehlerberechnung in Energieübertragungs- und Verteilnetzen
- Netzverlustanalysen
- Versorgungszuverlässigkeit
- Netzoptimierung
- Oberschwingungsanalysen an Netzanschlusspunkten des Übertragungsnetzes
- Berechnungen von transienten Vorgängen

## 12 Referenzen

Labor- und Vor-Ort-Kabeldiagnose (TE-Messung, TE-Ortung, Spannungsprüfung, Verlustfaktormessung)

- inetz GmbH, Chemnitz
- Stadtwerke Leipzig GmbH
- ENSO Netz, Dresden
- MITNETZ Strom GmbH, Halle/Saale
- Städtische Werke Magdeburg GmbH & Co. KG
- Stadtwerke Schwabach GmbH
- Basler Sachversicherungs- AG, Basel

Netzanalyse, Versorgungszuverlässigkeit

- eins energie in sachsen GmbH & Co. KG
- TOTAL Raffinerie Mitteldeutschland GmbH, Leuna

Betriebsmitteldatenbank

- TOTAL Raffinerie Mitteldeutschland GmbH, Leuna

Netzverluste

- eins energie in sachsen GmbH & Co. KG, Chemnitz
- Stadtwerke Annaberg-Buchholz Energie AG

Prognosen zum Elektroenergiebedarf und Spitzenleistungen einzelner Umspannwerke

- eins energie in sachsen GmbH & Co. KG, Chemnitz

Erstellung von Lastprofilen Strom/ Gas

- eins energie in sachsen GmbH & Co. KG, Chemnitz

Bewertung von Investitionsstrategien in der Elektroenergieversorgung

- ENSO Netz, Dresden

Isolationsprüfung, Stufentest

- Kabelwerk Meißen

FGH-Stufentest an Mittelspannungskabeln

- Stadtwerke Rostock

Temperaturbeständigkeit von Isolieranordnungen

- Kabelwerk Meißen

Berechnung maximaler Leitungsbelastung

- SPIE SAG Montagegesellschaft mbH, Chemnitz

Kurzschlussstromprüfung Schutzwiderstand

- Türk und Hillinger. Limbach-Oberfrohna

TE-Messung im Labor

- VEM motors Thurm GmbH
- eviro Elektromaschinenbau & Metall GmbH, Eibenstock

Dimensionierung Überspannungsschutz

- AREVA, Dresden

Bewertung transienter Ausgleichsvorgänge in Elektroenergiesystemen

- KEMA-IEV, Dresden
- AREVA, Dresden

Spannungsprüfung

- Elektrotechnische Geräte Böhlitz-Ehrenberg GmbH, Leipzig

Erstellung von Energiekonzepten zur Visualisierung der Auswirkungen von Potentialrealisierungen Erneuerbarer Energien in einem abgegrenzten Bilanzraum

- Landkreis Vogtland, Plauen

Untersuchungen der Auswirkungen der Verarmung von Masse bei Öl-Papier-Kabel

- inetz GmbH, Chemnitz

Entwicklung von Speicherkonzepten im Bereich von 1 bis 10 MW

- eins energie in sachsen GmbH & Co. KG, Chemnitz

Analyse von Nutzungskonzepten für energienahe Dienstleistungen

- eins energie in sachsen GmbH & Co. KG, Chemnitz

Definition der anteiligen Planungspegel für Oberschwingungen in Offshore-Netzen

- TenneT Offshore GmbH, Bayreuth

Untersuchung der Resonanzstellen und Störungsanalyse für das Netzanschlussssystem BorWin1 inklusive des Offshore-Netzes (OWP BARD und Global Tech I)

- TenneT Offshore GmbH, Bayreuth

Erweiterung des D- und D0-Schmelzsicherungssystems

- NH/HH Recycling e.V., Stamsried

Erstellung von Zielkonzepten für eine Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge

- eins energie in sachsen GmbH & Co. KG, Chemnitz

Analyse des Potenzials von Kühlhäusern für Demand Side Management

- Hörburger AG, Neukirchen

Analyse des Potenzials der Solarenergie zur Versorgung einer Schwimmhalle

- Stadtwerke Annaberg-Buchholz Energie AG

Untersuchung von elektrischen Gleichstromlichtbögen

- Mahle GmbH, Stuttgart

Untersuchungen an Flachsteckkontakten

- Mahle GmbH, Stuttgart

- Dometic GmbH, Siegen

Analyse des Schaltverhaltens von LED-Straßenbeleuchtung und der resultierenden Netzurückwirkungen

- inetz GmbH, Chemnitz

Labormessungen an MS-Kabelmuffen

- MITNETZ Strom GmbH, Halle/Saale

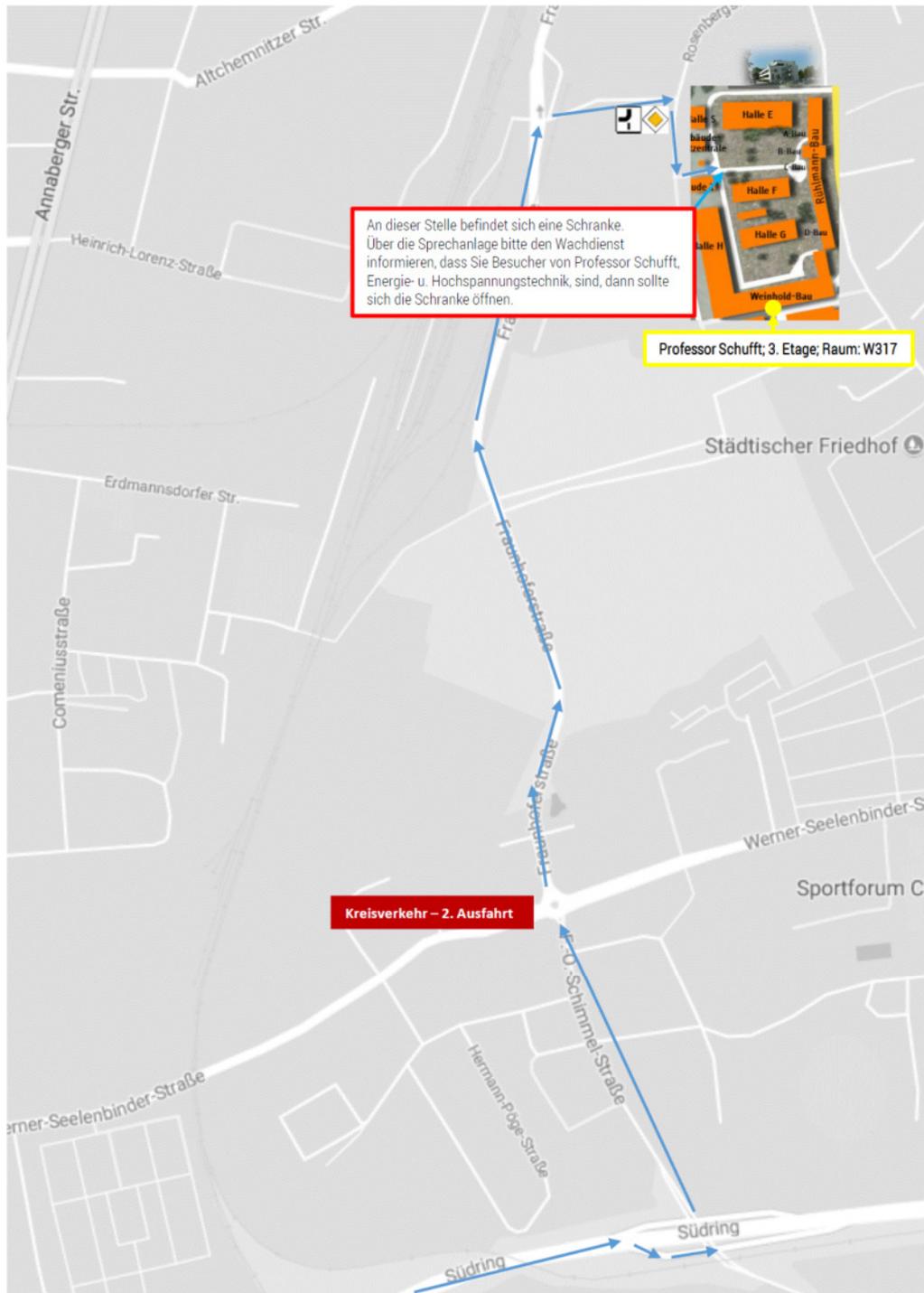
- inetz GmbH, Chemnitz



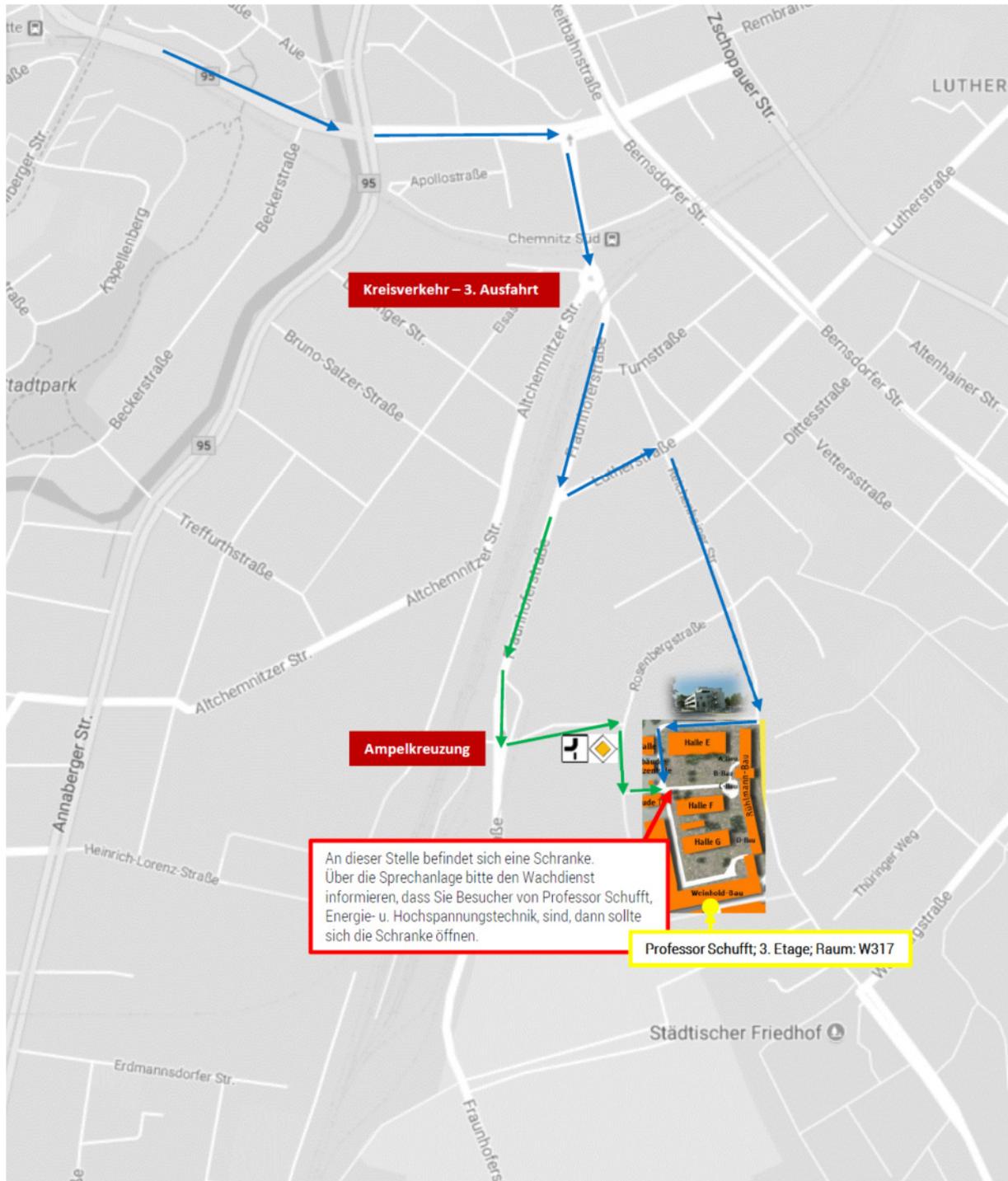
Teilgebiete		Elektrische Energietechnik				Hochspannungstechnik				
Inhalt		Regenerative Energiequellen	Energie-management	Elektroenergiesysteme	Beanspruchung von Betriebsmitteln	Überspannungen u. Isolationskoordination	Geräte- und Isoliertechnik			
<b>Bachelor-Studiengang Elektrotechnik</b>										
Semester										
Modularisierte Bachelor-Master-Studiengänge	3.	Elektrische Energietechnik/Nachhaltige Elektroenergieerzeugung 2 1 0								
	4.									
	5.	Hochspannungstechnik 3 1 2								
	6.	Vertiefungsmodul (Pflicht, Wahlpflicht, Wahl)		Elektroenergieübertragung und -verteilung 3 1 2		Netze und Betriebsmittel 2 1 0		Bachelorarbeit		
	<b>Master-Studiengang Energie- und Automatisierungssysteme</b>									
7.	Ergänzungsmodul (Pflicht, Wahlpflicht, Wahl)		Elektroenergiewirtschaft 1 0 0		Beanspruchung von Betriebsmitteln 3 1 1					
					Statistik und Isolationskoordination 2 1 0					
8.			Netzberechnung und Schutztechnik 1 1 0		Diagnose- und Messtechnik 2 0 0					
			Praktikum							
9.	Masterarbeit									
10.										
<b>Forschungsschwerpunkte</b>										
Analyse von Netzen und Betriebsmitteln	Zustandsbewertung und Asset-Management									
	Oberschwingungsverhalten regenerativer Erzeugungsanlagen / Ausgleichsvorgänge im Elektroenergiesystem									
	Netzanbindung leistungsstarker Windparks									
	Netzintegration der Elektromobilität									
	Modellierung zukünftiger Niederspannungsnetze									
Dezentrale Energiesysteme	Speichersysteme für eine nachhaltige Energieversorgung									
	Probabilistische Netzplanung									
<b>Anspruch: Kompetenzzentrum für aktuelle Fragestellungen der Elektroenergieversorgung</b>										

**Anfahrtsskizze:**

Über Autobahnkreuz Chemnitz Süd – B173 – B169



Über Autobahnkreuz Chemnitz-Mitte A4 – B95



Weiterhin ist die Professur mit der neuen Straßenbahnlinie 3 zu erreichen. Diese verbindet den Hauptbahnhof mit dem Universitätsstandort Straße der Nationen (Haltestelle Theaterstraße) sowie mit dem Universitätsstandort Reichenhainer Straße (Haltestelle TU Campus).

## Notizen

## Notizen

## Notizen

## Notizen

## Notizen