

**Adresse:**

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

**Dienstsitz:**

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.: Antje Voit	+49 371 531 33142	+49 371 531 833142	antje.voit@etit.tu-chemnitz.de
Dr. T. Bocklisch	+49 371 531 32133	+49 371 531 832133	thilo.bocklisch@etit.tu-chemnitz.de
B. Born	+49 371 531 36117	+49 371 531 836117	bjoern.born@etit.tu-chemnitz.de
M. Böttiger	+49 371 531 33445	+49 371 531 833445	michael.boettiger@etit.tu-chemnitz.de
A. Götz	+49 371 531 37199	+49 371 531 837199	andreas.goetz@etit.tu-chemnitz.de
A. Gürlek	+49 371 531 39859	+49 371 531 839859	akif.guerlek@etit.tu-chemnitz.de
S. Hadid	+49 371 531 38579	+49 371 531 838579	suleiman.hadid@etit.tu-chemnitz.de
A. Hoshmeh	+49 371 531 38717	+49 371 531 838717	abdullah.hoshmeh@etit.tu-chemnitz.de
J. Lindner	+49 371 531 31863	+49 371 531 831863	lijoh@etit.tu-chemnitz.de
J. Lippold	+49 371 531 33341	+49 371 531 833341	juergen.lippold@etit.tu-chemnitz.de
K. Malekian-Borou- jeni	+49 371 531 37648	+49 371 531 837648	kaveh.malekian-boroujeni@etit.tu-chemnitz.de
G. Nourirad	+49 371 531 31355	+49 371 531 831355	ghasem.nourirad@etit.tu-chemnitz.de
M. Paulitschke	+49 371 531 39395	+49 371 531 839395	martin.paulitschke@et.it.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
J. Teuscher	+49 371 531 37752	+49 371 531 837752	jens.teuscher@et.it.tu-chemnitz.de

**Redaktion:** Andreas Götz

**Titelfoto:** Forschergruppe „ECoMobility“ (Foto: Akif Gürlek)

# 1 Vorwort

Sehr geehrte Freunde und Partner,

das Jahr 2015 ist Geschichte. Damit wird es Zeit zu resümieren, was wir im vergangenen Jahr leisten konnten und was uns bewegt hat.

Lehre und Forschung waren im Großen und Ganzen durch Kontinuität geprägt.

Besondere Herausforderungen ergeben sich in der Lehre. So hat der prozentuale Anteil der ausländischen Studenten, die in unsere konsekutiven Masterstudiengänge einsteigen, deutlich zugenommen. Die Zugangsvoraussetzungen werden nur anhand von übersetzten Zeugnissen geprüft, so dass in der Realität ein sehr heterogenes Grundlagenwissen vorhanden ist. Da ist es schwierig, möglichst alle mitzunehmen. Großen Sorgen machen uns die Sprachkenntnisse chinesischer Studenten in Praktika und mündlichen Prüfungen. Auch über die Zeit gibt es mitunter kaum Fortschritte beim Erwerb der deutschen Sprache. Früher oder später werden wir wohl zu individuellen Eingangsprüfungen bei der Zulassung übergehen müssen.

Unsere Aktivitäten in der Forschung waren sehr erfolgreich. Derzeit befinden sich gleich mehrere Promotionsvorhaben in der Endphase. Besonders freuen wir uns über den „Auftragseingang“ im Verlaufe des vergangenen Jahres. Unsere Mühe beim Entwickeln von Förderprojekten hat sich gelohnt, vielleicht war ja auch Fortuna mit im Boot. Nun sind wir in drei hochkarätigen Förderprojekten mit dabei, nämlich „Netzharmonie“, „ECoMobility“ und „Optistore“. Der Förderzeitraum erstreckt sich über die nächsten zwei bis drei Jahre, das Gesamtfördervolumen beträgt etwa 1 Mio. €. Zudem wurde uns von der DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) ein Investitionsantrag gemäß dem Hochschulbaufördergesetz (HBFZ) genehmigt, so dass wir die Modernisierung unseres Prüffeldes für Mittelspannungskabel im Mai abschließen konnten.

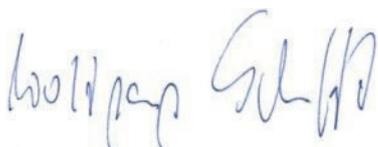
Leider gibt es nicht nur Erfreuliches zu berichten. So ist unser langjähriger Lehrbeauftragter Herr Dr.-Ing. Reinhardt Fuchs während des Sommersemesters, in dem er tätig war, plötzlich und unerwartet im Alter von nur 61 Jahren verstorben. Wir trauern mit seiner Familie und seinen Freunden.

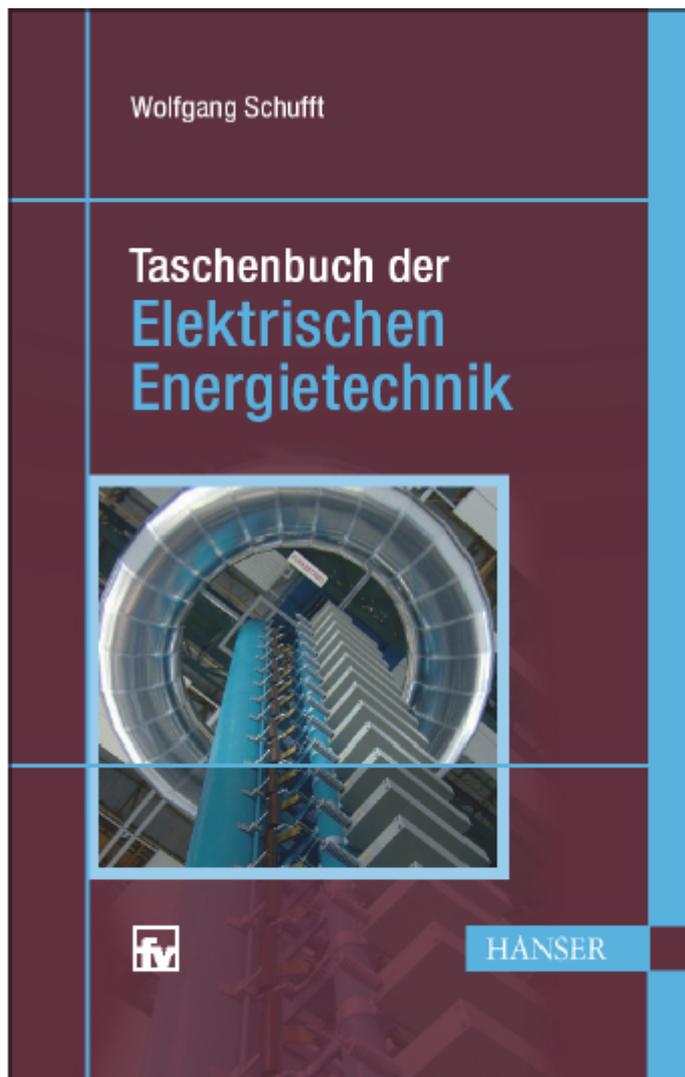
Nach der langwierigen Rekonstruktion des Weinholdbaus wurde nun auch der neben dem Weinholdbau befindliche Gebäudekomplex des Bundesexzellenzclusters MERGE (Strukturleichtbau) samt seiner Außenanlagen fertiggestellt. Damit endet eine fast zehnjährige Bauphase mit Baulärm und entsprechenden Einschränkungen. Nunmehr stehen um den Weinholdbau keine weiteren bebaubaren Flächen zur Verfügung, so dass wir uns auf eine lange Zeit störungsarmen Arbeitens freuen. Dafür wächst der Campus erfreulicherweise an anderen Stellen.

Mit Optimismus sehen wir dem kommenden Jahr 2016 entgegen. Wir wünschen auch Ihnen viel Glück, Erfolg und persönliches Wohlergehen und freuen uns auf eine weitere, gute Zusammenarbeit.

Chemnitz, Dezember 2015

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

<b>1</b>	<b>Vorwort .....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Personelle Besetzung .....</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Lehre .....</b>	<b>8</b>
3.1	Studienablaufplan im Bachelor-Studiengang Elektrotechnik und im Master-Studiengang Energie- und Automatisierungssysteme .....	8
3.2	Beschreibung der Lehrfächer der Professur.....	9
<b>4</b>	<b>Forschung .....</b>	<b>12</b>
4.1	Schwerpunkte .....	12
4.2	Aktuelle Promotions- und Habilitationsvorhaben .....	14
<b>5</b>	<b>Abgeschlossene wissenschaftliche Arbeiten.....</b>	<b>34</b>
5.1	Bachelorarbeiten .....	34
5.2	Masterarbeiten .....	35
<b>6</b>	<b>Veröffentlichungen und Konferenzbeiträge.....</b>	<b>36</b>
<b>7</b>	<b>Externe Aktivitäten und Kontakte .....</b>	<b>37</b>
7.1	Teilnahmen an Konferenzen, Tagungen, Kolloquien .....	37
7.2	Gäste an der Professur .....	38
7.3	Höhepunkte .....	39
<b>8</b>	<b>Ausstattung für Praktika und Prüfungen in der Hochspannungstechnik.....</b>	<b>46</b>
<b>9</b>	<b>Laboraausstattung .....</b>	<b>49</b>
<b>10</b>	<b>Dienstleistungen.....</b>	<b>52</b>
10.1	Dielektrische Prüfungen .....	52
10.2	Diagnosemöglichkeiten.....	52
10.3	Prüfung der Stromtragfähigkeit .....	52
10.4	Spezielle Messaufgaben .....	53
10.5	Virtueller Stoßspannungsgenerator .....	53
10.6	Netzanalysen .....	53
<b>11</b>	<b>Referenzen .....</b>	<b>54</b>

## 2 Personelle Besetzung



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



Dr.-Ing. Thilo Bocklisch  
Habilitation



Dipl.-Ing. Michael Böttiger  
Doktorand



Dipl.-Ing. Björn Born  
Doktorand



Dr.-Ing. Reinhardt Fuchs †  
Lehrbeauftragter



Dipl.-Ing. Andreas Götz  
Doktorand



Dipl.-Ing. Akif Gürlek  
Doktorand



M.Sc. Suleiman Hadid  
Doktorand



B.Sc. Abdullah Hoshmeh  
Doktorand



Dipl.-Ing. David Kühnert  
Doktorand bis 01/15



Jürgen Lippold  
Technischer Angestellter



M.Sc. Kaveh Malekian-Boroujeni  
Doktorand



B.A. Antje Voit  
Sekretariat



Prof. Dr.-Ing. Norbert Menke  
LVV mbH  
Lehrbeauftragter



M.Sc. Ghasem Nourirad  
Doktorand



Dipl.-Ing. Martin Paulitschke  
Doktorand



Dr. rer. nat. Ralf Pietsch  
HIGHVOLT Dresden



M.Sc. Farhad Safargholi  
Doktorand seit 06/15



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



Dr.-Ing. Ali Shirvani-Boroujeni  
Promovierter Mitarbeiter bis  
06/15



Michael Stark  
Technischer Angestellter



Dr.-Ing. Jens Teuscher  
Promovierter Mitarbeiter seit 03/15

### 3 Lehre

#### 3.1 Studienablaufplan im Bachelor-Studiengang Elektrotechnik und im Master-Studiengang Energie- und Automatisierungssysteme

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>					2 0 0		
Elektroenergiewirtschaft	Menke					1 0 0	
Netzberechnung und Schutztechnik	Teuscher						1 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 aus Wasserkraftwerken, Elektroenergieerzeugung aus 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, Kraftwerkseinsatz 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: 7 Vorlesungen / 7 Übungen

**Dr. Teuscher**

Inhalt: Auswirkungen des elektrischen Stromes auf den Menschen, Erdungen, Schutzmaßnahmen im Niederspannungsnetz, Schutz im Mittelspannungsnetz, Schutzkriterien und Sensoren, netzformabhängiger Schutz von Kabeln und Freileitungen, Schutz von Transformatoren, Netzbetrieb im Mittelspannungsnetz, Leit- und Fernwirktechnik, Digitale Schutztechnik

**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.



Abb.: Forschungsschwerpunkte und Arbeitsgebiete der Professur

**Netzintegration der Elektromobilität**

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

**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 (Nachwuchsforschergruppe IDE)
- Konzepte zur Speicherung von Elektroenergie im Megawatt-Bereich
- Experimentelle Untersuchung, Modellierung und Simulation von Brennstoffzellen, Wasserstoffspeichern und Elektrolyseanlagen (Hybrid-Speicher-Systeme)
- Konzepte und Verfahren für Hybridsysteme mit Batterie- und Wasserstoff-Speicherpfad zum Ausgleich dynamischer Erzeuger- und Verbraucherschwankungen im Kurz- und Langzeitbereich

**Probabilistische Netzplanung:**

- Probabilistische Untersuchung zur Bewertung der Lastsituation unter Einbeziehung dezentraler Erzeugungseinheiten
- Untersuchung der Einspeisecharakteristik von Photovoltaik und Windenergie in der Mittelspannungsebene

**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 Anlagengütern 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 Hoch- und Höchstspannungsebene
- Berechnung von Überspannungen bei Schalt- und Fehlervorgängen im Mittelspannungs- und Hochspannungsnetz

**Isolationskoordination**

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

**Oberschwingungsverhalten regenerativer Erzeugungsanlagen**

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

## 4.2 Aktuelle Promotions- und Habilitationsvorhaben

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

- Dr. Bocklisch, T.:** Habilitationsvorhaben: Verfahren zur optimalen Auslegung und Betriebsführung hybrider Energiespeichersysteme
- Born, B.:** Integration von Energiespeichereinheiten in ein multimodales Mobilitätskonzept zur ökologischen Bereitstellung der benötigten Energie
- Böttiger, M.:** Beitrag zur technisch-wirtschaftlichen optimierenden Betriebsführung von PV-Batteriespeichersystemen
- Götz, A.:** Zukünftige Belastungen von Niederspannungsnetzen unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität
- Gürlek, A.:** Untersuchungen an der Spitze-Spitze-Elektrodenanordnung mit großen Elektrodenabständen bei Blitzspannungen
- Hadid, S.:** Frequenzabhängigkeit des Verlustfaktors an VPE-isolierten Mittelspannungskabeln
- Hoshmeh, A.:** Frequenzabhängige Modellierung von Kabeln für die Simulation transienter Vorgänge im Zeitbereich
- Hunold, S.\*:** Algorithmische Bestimmung der Ausfallcharakteristik von Mittelspannungs-Kabelmuffen auf der Basis von diagnostischen Messwerten und Betriebsmitteldaten
- Kühnert, D.\*:** Entwicklung einer intelligenten Ladesteuerung für Elektrofahrzeuge in einem Mobility-On-Demand-Konzept unter der Nutzung lokaler regenerativer Energien
- Malekian-Boroujeni, K.:** Wechselwirkung zwischen Windpark und Netz – Beurteilung des Oberschwingungsverhaltens von Windparks
- Nourirad, G.:** Untersuchungen zu Störeinflüssen auf die Verlustfaktormessung und ihrer Reproduzierbarkeit
- Paulitschke, M.:** Untersuchung eines Partikel-Schwarm-Optimierers zur Auslegung von autarken Energieversorgungssystemen
- Dr. Teuscher, J.:** Leistungsflussoptimierendes Energiemanagement von dezentralen Energieversorgungssystemen in zukünftigen Niederspannungsnetzstrukturen (Promotion am 05. März 2015 abgeschlossen)
- Lindner, J.\*:** Intelligente Energiebereitstellung mit PV-, Windenergieanlage und Hybridspeichersystem für Industriebetriebe

\* externe Promotion



**Beitrag zur technisch-wirtschaftlich optimierenden Betriebsführung von PV-Batteriespeichersystemen**

Dipl.-Ing. Michael Böttiger

Der Umbau des auf fossilen Energieträgern basierenden, hin zu einem auf erneuerbaren Energien stützenden Energieversorgungssystem stellt die Gesellschaft vor die Bewältigung einiger Herausforderungen, z.B. die Belastung der Verteilnetze durch die relativ starken Schwankungen und Spitzenleistung im erneuerbaren Energieangebot, Überlastungen von Betriebsmitteln sowie Spannungsbandverletzung. Intelligente Energiespeichersysteme stellen als qualitativ ergänzende Flexibilisierungsoption einen Beitrag zur Lösung dieser Probleme dar. Ein Anwendungsfeld für intelligente Energiespeicher stellen dezentrale Photovoltaik(PV)-Batteriespeichersysteme im häuslichen Bereich dar. Aktuell sind in Deutschland mehr als 15.000 Batteriespeichersysteme (Prognose für die kommenden Jahre stark steigend) installiert. Diese arbeiten meist nur nach einfachen prioritätsbasierten Verfahren zur Erhöhung des Eigenverbrauchs an Solarenergie. Aspekte wie Netzentlastung, Optimierung der Komponentenlebensdauer und Steigerung der Effizienz des Gesamtsystems werden bei der Betriebsführung vernachlässigt.

Dieser Beitrag stellt Simulationsergebnisse zur Untersuchung eines neuartigen optimierenden Energiemanagements, siehe Abbildung 1, für ein PV-Batteriespeichersystem vor. Dieses lässt sich in ein Prognosemodul, ein Optimierungsmodul und eine reaktives Management-Modul unterteilen.

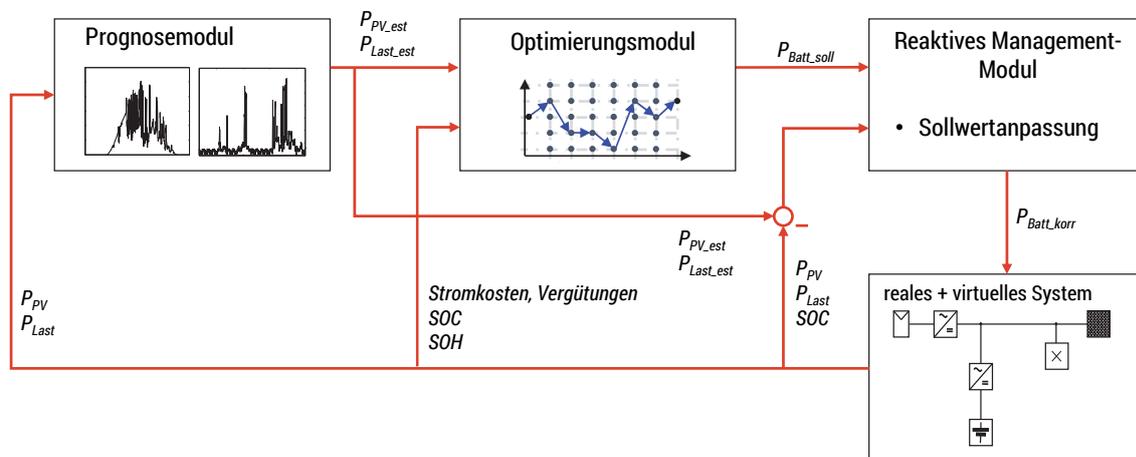


Abb. 1: Struktur des optimierenden Energiemanagements

Das Prognosemodul umfasst die Prädiktion der Solar- und Lastleistung für den folgenden Tag. Zur Prognose des Lastgangs wurde zunächst ein Persistenzansatz gewählt. Anhand drei vergangener gleicher Wochentage, gewichtet mit einem Vergessens-Faktor, wird der Verlauf des zukünftigen Lastgangs ermittelt. Die Prognose der Solarleistung erfolgt durch Mittelwertbildung der letzten zwei Tage. Das Optimierungsmodul berechnet auf Grundlage der im Prognosemodul ermittelten Zeitreihen, einen Leistungssollwert der Batterie für den nächsten Tag. Basierend auf dem Prinzip der dynamischen Programmierung findet der Algorithmus in Abhängigkeit des Prädiktionshorizonts, der definierten Randbedingungen und Gütekriterien den bestmöglichen Verlauf.

Das reaktive Management kompensiert kleinere Abweichungen zwischen den prognostizierten und dem realen Ladezustandsverlauf.

Untersuchungsgegenstand der in diesem Beitrag vorgestellten Simulation ist der Einfluss der Prognose. Durchgeführt wurde eine Jahressimulation mit einer Schrittweite von 60 s unter der Verwendung von realen Messdaten (Referenzobjekt nahe Chemnitz, PV 5 MWh, Last 4 MWh). Zur Bewertung der Simulationsergebnisse werden die Stromkosten  $K$ , der Selbstversorgungsgrad  $A$ , die Zyklenzahl  $Z$  und die Abregelverluste  $P_{ARV}$ , die auftreten falls die maximale Netzeinspeiseleistung von 2 kW überschritten wird, herangezogen. Abbildung 2 zeigt beispielhaft die Leistungswerte (oben) und den Ladezustand SOC der Batterie (unten) für zwei ausgewählte Tage mit idealer Prognose. Schwarz dargestellt ist die Differenzleistung (PV-Leistung  $P_{PV}$  - Lastleistung  $P_{Last}$ ), grün die Batterieleistung  $P_{Batterie}$  und rot die Netzleistung  $P_{Netz}$ . Gut zu erkennen ist, dass die maximale Netzeinspeiseleistung nicht überschritten wird und somit auch keine Abregelverluste auftreten.

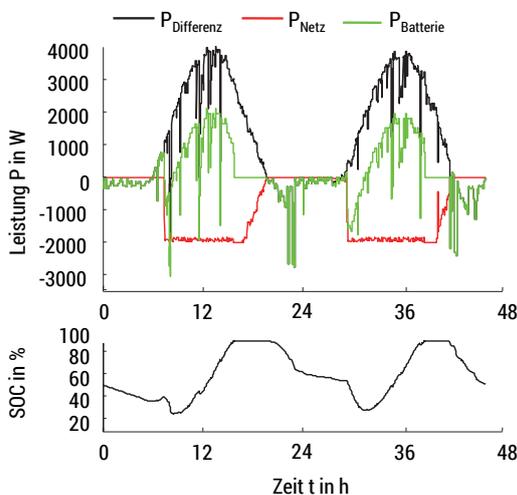


Abb. 2: Leistungsflüsse (oben) und Ladezustand (unten) zweier Beispieltage

Tabelle 1: Vergleich Prognosemethoden

Prognoseansatz	Ideal	Persistenz
Stromkosten $K$ in €	477	675
Selbstversorgungsgrad $A$ in %	60	36
Zyklenzahl $Z$	260	360
Abregelverluste $P_{ARV}$ in kWh	0	52

Vergleicht man für dieses Fallbeispiel jedoch die Simulationsergebnisse der Persistenzprognose mit einer idealen Prognose, siehe Tabelle 1, so werden deutliche Defizite der einfachen Prognosemethode erkennbar. Neben der höheren Belastung der Batterie, sinkt der Selbstversorgungsgrad um knapp 50 % und die Stromkosten fallen 30 % höher aus.

Im nächsten Schritt gilt es daher sowohl die Prognosemethode als auch die Robustheit des Energiemanagements gegenüber Prognoseunsicherheiten zu verbessern. Weiterhin steht die Entwicklung eines praxistauglichen Alterungsmodells für Lithium-Ionenbatterien im Vordergrund.

Literatur:

Böttiger, M.; Bocklisch, T.; Paulitschke, M.: "Optimizing model-based energy management for a photo-voltaic battery system ", 9. Internationale Konferenz zur Speicherung Erneuerbarer Energien IRES 2015, Eurosolar, Düsseldorf, 2015

Böttiger, M.; Bocklisch, T.; Paulitschke, M.: „Optimierendes modellbasiertes Betriebsführungskonzept für ein PV-Batteriespeichersystem“, 29. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2014, 978-3-943891-31-7



## Untersuchung eines Partikel-Schwarm-Optimierers zur Auslegung von autarken Energieversorgungssystemen

Dipl.-Ing. Martin Paulitschke

Diese Forschungsarbeit beschäftigt sich mit der Implementierung und Untersuchung eines Partikel-schwarm-Algorithmus zur Optimierung eines regenerativen autarken Energieversorgungssystems auf Basis von Solarenergie. Die Versorgung von autarken Inselösungen mit rein solarer Energiequelle stellt hohe Anforderungen an ein Speichersystem, wobei Kurzzeitschwankungen im Tagesbereich ebenso abgedeckt werden müssen wie saisonale Schwankungen. Untersuchungen haben gezeigt, dass sich ein hybrider Ansatz aus Batteriespeicher und Wasserstoff-Pfad zur Sicherstellung der Energieversorgung eignet (s. Abb. 1).

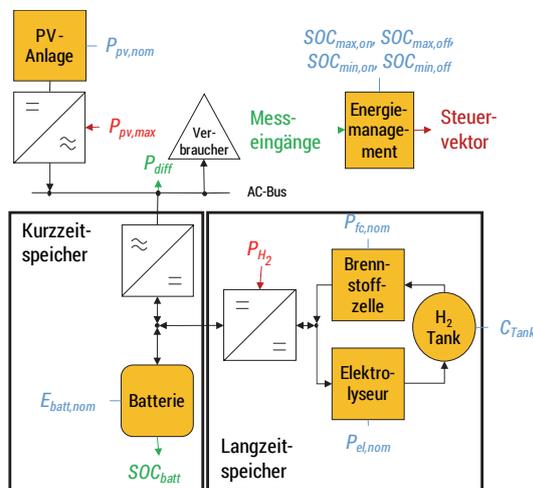


Abb. 1: Struktur der autarken Energieversorgungs-einheit

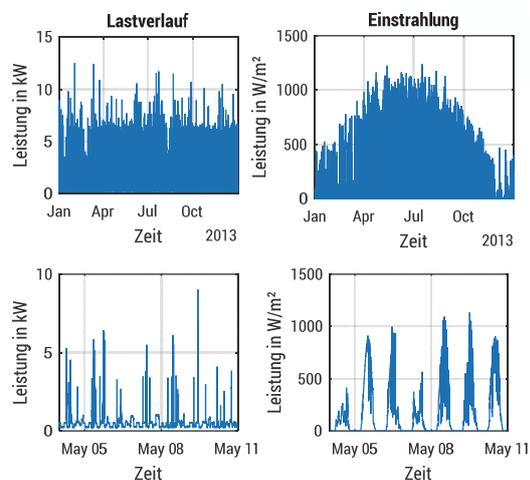
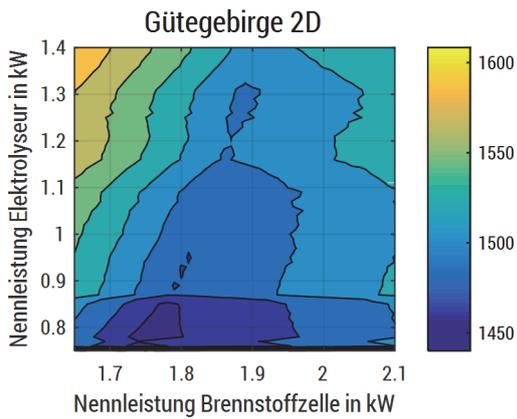


Abb. 2: Zur Simulation genutzte Lastzeitreihe und Einstrahlungsprofil

Das autarke Energieversorgungssystem soll möglichst kompakt dimensioniert, sowie effizient, schonend und sicher betrieben werden. Um das Energieversorgungssystem bewerten zu können, wurde eine Gütefunktion aufgestellt welche die Investitionskosten (Komponentengröße), die dynamische Belastung (Lebenszeit und Wiederbeschaffungskosten), Effizienz und die Versorgungssicherheit zu einem Gütewert zusammenfasst. Der Gütewert wird durch eine Simulation des Systems über ein volles Jahr berechnet. Dabei wird das Einstrahlungsprofil des Ortes an dem die PV-Anlage aufgestellt werden soll, sowie der Lastgang des zu versorgenden Verbrauchers herangezogen (s. Abb. 2).

Um eine optimale Güte des AVES zu erhalten, können die Größe der Batterie, der Wandler-Komponenten (Brennstoffzelle und Elektrolyseur), der PV-Anlagengröße und der Betriebsführungsparameter optimiert werden. Durch die simulative Berechnung des Gütewertes ergibt sich ein hoch komplexes Gütegebirge welche nichtlinear, unstetig und multimodal ist (s. Abb. 3). Darüber hinaus ergeben sich bei etwa 65 % aller möglichen Einstellungswerte ungültige Systemzustände (z.B. Last kann nicht abgedeckt werden). Mittels stochastischer, metaheuristischer Optimierungsverfahren, wie den Evolutionären Algorithmen lässt sich eine ausreichend gute Lösung finden.



Komponente	spez. Kosten	Lebenszeit
PV	1300 €/kW	20 Jahre
Batterie	500 €/kWh	3000 Zyklen
Elektrolyseur	1000 €/kW	5000 Schalthandlungen
Brennstoffzelle	1000 €/kW	5000 Schalthandlungen

Abb. 3: beispielhafter zweidimensionaler Ausschnitt aus Gütegebirge

Tab. 1: angenommene Komponentenkosten und EOL Bedingungen

In der Forschungsarbeit wurde ein Partikel-Schwarm-Algorithmus implementiert, untersucht und erweitert. Zunächst wurde der standardisierte Original-Algorithmus nach Bratton und Kennedy [1] in MATLAB implementiert und auf das Problem angewandt. Untersuchungen der Einstellung des Partikel-Schwarm-Algorithmus, wie die Geschwindigkeitsparameter und die Nachbarschaftsbeziehungen wurden durchgeführt um den Algorithmus optimal an das Problem anzupassen. Z.B. konnte herausgefunden werden, dass eine zufällige lokale Nachbarschaftsbeziehung zu einem sehr guten Konvergenzverhalten des Algorithmus führt.

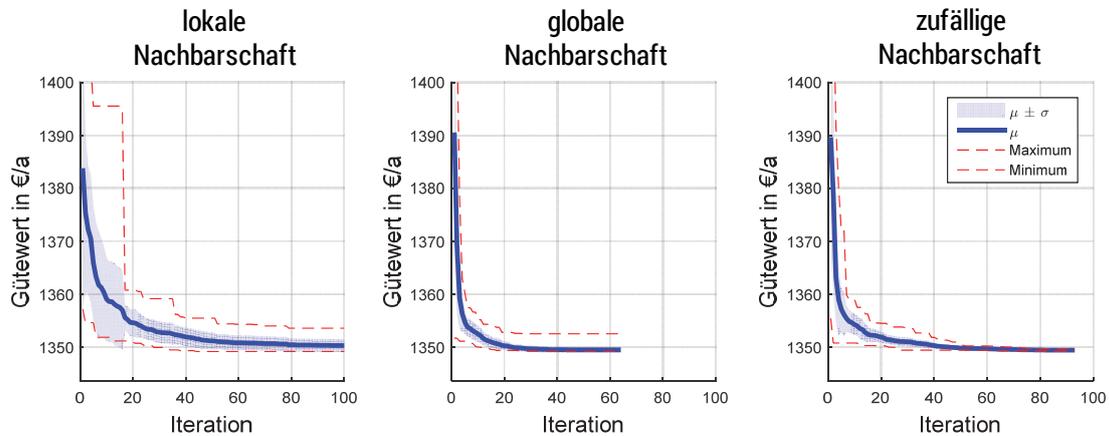


Abb. 4: Vergleich des Konvergenzverhaltens von 50 Optimierungsläufen bei lokaler, globaler und zufälliger Nachbarschaft

Das Problem des hohen Anteils an ungültigen Parametereinstellungen, welche mit einer hohen Unstetigkeit und Nichtlinearität im Gütegebirge auftreten, konnte durch eine Erweiterung des Bewegungsverhaltens der Partikel gut bewältigt werden. Im Vergleich zu einem genetischen Algorithmus als Lösungsverfahren hat sich der implementierte Algorithmus als vorteilhaft herausgestellt.

Mit dem erweiterten Partikelschwarm-Algorithmus lässt sich eine Optimierung im Hinblick auf Kosten und Lebenszeit durchführen, um so die potentiale der verschiedenen Speichertechnologien besser in Einklang zu bringen und die erneuerbare Energieversorgungen weiteren voran zu bringen.



### Zukünftige Belastungen von Niederspannungsnetzen unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität

Dipl.-Ing. Andreas Götz

Im Rahmen des Promotionsprojektes wurde unter anderem die zukünftige Belastung der Elektromobilität auf das Niederspannungsnetz untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass hinsichtlich der Ladestandorte und Ladevarianten zu differenzieren ist. Die Ladestandorte sind durch die Eigentumsverhältnisse des Grund und Bodens, der Standzeiten und der Ladeleistungen gekennzeichnet. Abbildung 1 zeigt die vorgenommene Klassifizierung.

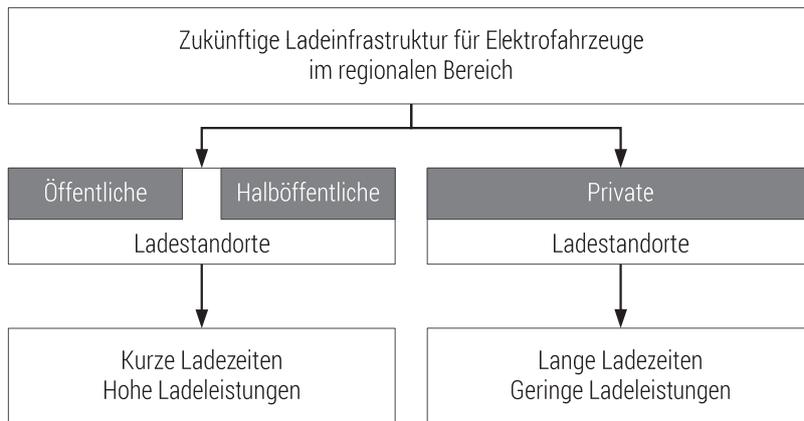
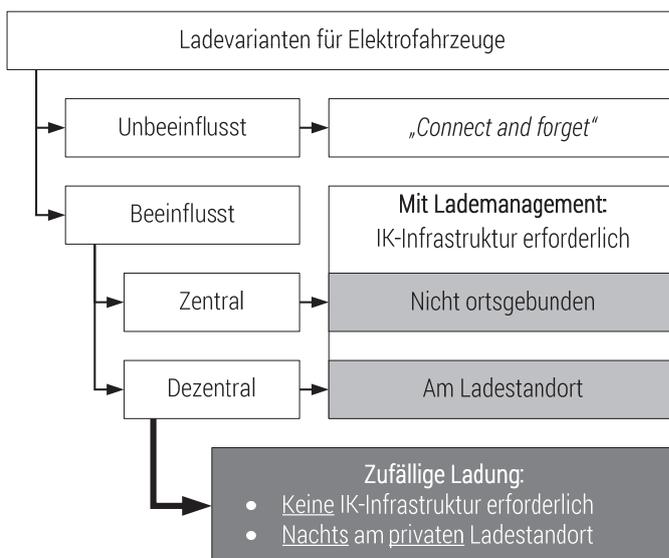


Abb. 1: Klassifizierung der regionalen Ladestandorte für Elektrofahrzeuge

Aufgrund des hohen Anteils an Elektrofahrzeugen von ca. 60 % [FHG], welche in Zukunft an den privaten Ladestandorten zu laden sind, gilt es diese genauer zu untersuchen. Dabei ist prinzipiell in folgende Ladevarianten zu unterscheiden (Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. Abbildung 2).



Grundsätzlich unterscheiden sich diese Ladevarianten in der zulässigen Anzahl an Elektrofahrzeugen für ein Niederspannungsnetz bis es zu einer Überlastung des Ortsnetztransformators kommt.

Beim unbeeinflussten Laden ist die zulässige Anzahl an Elektrofahrzeugen am geringsten, da alle Elektrofahrzeuge zu Zeiten der abendlichen Hochlast des Standardlastprofils laden.

Abb. 2: Klassifizierung der Ladevarianten für Elektrofahrzeuge

Durch die Beeinflussung der Ladung beginnen die Ladevorgänge nicht sofort nach dem Erreichen der Elektrofahrzeuge am privaten Standort, sondern werden zeitlich verschoben. Dies kann durch ein zentrales Lademanagement realisiert werden, welches eine umfangreiche Informations- und Kommunikations-Infrastruktur (IK-Infrastruktur) benötigt.

Jedoch ist eine zentrale Beeinflussung von Ladevorgängen nicht zwingend notwendig. Denn mit der dezentral beeinflussten Ladung kann auf die umfangreiche und kostenintensive Informations- und Kommunikations-Infrastruktur verzichtet werden. Eine technische Realisierung dieser Ladevariante wurde bereits am 23.10.2012 mit der Bezeichnung „Schaltverzögerte Steckdose“ als Erfindung gemeldet [Pat]. Durch eine zufällige Verteilung der Ladevorgänge auf die Nachtstunden kann der nächtliche Niedriglastbereich der Standardlast gefüllt werden. Hierfür wurden zahlreiche Simulationen zur Netzbelastung bei unterschiedlichen Durchdringungen von Elektrofahrzeugen in ausgewählten, realen Niederspannungsnetzen durchgeführt.

Als Ergebnis der Forschung liegen nun quantitative Aussagen zu der zulässigen Anzahl an Elektrofahrzeugen in ausgewählten Niederspannungsnetzen vor. Diese Aussagen können anhand von Zieldiagrammen, welche simulativ erstellt wurden, generiert werden.

Die ermittelte zulässige Anzahl an Elektrofahrzeugen für die verschiedenen Ladevarianten lassen sich miteinander vergleichen. Dabei ist auffällig, dass bei der zufälligen Ladevariante bis zu 5-mal mehr Elektrofahrzeuge als bei der unbeeinflussten Ladung geladen werden können, bis es zu einer Überlastung des Niederspannungsnetzes kommt. Die so realisierte Anzahl an Elektrofahrzeugen erreicht bereits das Maximum an generell zu erwartenden Pkw in einem Niederspannungsnetz.

So lässt sich sicherstellen, dass ein effizienter Ressourceneinsatz bei der Realisierung einer Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge erreicht werden kann, da es nicht zwingend erforderlich ist, ein zentral gesteuertes Lademanagement incl. Informations- und Kommunikations-Infrastruktur für die nächtliche Aufladung am privaten Standort aufzubauen und zu betreiben. Auf einen Netzausbau ist ebenfalls verzichtbar [Götz1, Götz2]. Die durch Simulationen an realen Niederspannungsnetzen gewonnenen Erkenntnisse wurden anschließend zur Anwendbarkeit auf beliebige andere Niederspannungsnetze verallgemeinert. So kann eine langfristig optimale Planung von Niederspannungsnetzen gewährleistet werden.

[FHG] Fraunhofer ISI, „Wirtschaftlichkeit von Ladeinfrastrukturkonzepten,“ [Online: 17. 03. 2015]

[Pat] A. Götz und W. Schufft, „Schaltverzögerte Steckdose – Zufällig generierte Lastfreischaltung für einen Elektroenergieanschluss“. Deutschland Patent DE102012110091A1, 15. 05. 2014

[Götz1] A. Götz und W. Schufft, „Innovative und effektive Integration von Elektrofahrzeugen ins Niederspannungsnetz,“ in VDE-Kongress: „Smart Cities – Intelligente Lösungen für das Leben in der Zukunft“, Frankfurt am Main, 2014

[Götz2] Götz, A; W. Schufft: Anforderungen an ein smart grid mit Aufwand-Nutzen-Optimum. Stuttgart, VDE Verlag, 2012. 978-3-8007-3446-7



## Integration von Energiespeichereinheiten in ein multimodales Mobilitätskonzept zur ökologischen Bereitstellung der benötigten Energie

Dipl.-Ing. Björn Born

Im Zusammenhang mit dem Forschungsprojekt ECo-Mobility soll das bereits vorhandene Mobilitätskonzept fahrE um stationäre Energiespeicher erweitert werden. Im aktuellen System werden beim Ladevorgang die vorhandenen PKWs direkt aus dem Niederspannungsnetz mit Energie versorgt. Die dabei zur Verfügung gestellte Leistung wird von der Ladesäule begrenzt und über den Ladevorgang konstant aus dem elektrischen Netz bezogen. Zudem ist das Lademanagement darauf ausgelegt vorhandene Prognosen des bevorstehenden Verbrauchs und der prognostizierten Erzeugung von Erneuerbaren Energien in die Auswahl der Ladezeiträume mit einzubeziehen.

Weiterführend sollen im Projekt ECo-Mobility die Bedingungen für den Einsatz und die Integration von Elektromobilität ökologisch und ökonomisch verbessert werden. Unter dieser Zielsetzung ergeben sich für die Einbindung der Ladeinfrastruktur in das vorhandene Niederspannungsnetz folgende Ansätze: Zunächst ergibt sich die grundlegende Legitimation des vermehrten Einsatzes von Elektromobilität aus der ökologischen CO<sub>2</sub>-Bilanz der genutzten Energie. Dieser Umstand ist dann gegeben, wenn der größte Anteil der Ladeenergie aus Erneuerbaren Energieträgern stammt. Es muss daher das Ziel sein, den Anteil aus regenerativen Quellen an der Ladeenergie zu erhöhen. Dies kann durch einen gezielten Energieverbrauch in Zeitintervallen mit hoher Erneuerbaren Energieerzeugung realisiert werden.

Trotz der potentiell besseren ökologischen Bilanz der Elektromobilität bestehen aus ökonomischer und ökologischer Sicht bei der Energieversorgung der Ladeinfrastruktur weiterhin Hindernisse. Zum einen besitzen die Ladeeinheiten einen vergleichsweise hohen Leistungsbedarf, der das Niederspannungsnetz an den entsprechenden Anschlusspunkten gesteigert belastet. Zum anderen kann die Summe aller Ladeleistungen so groß werden, dass weitere Ladesysteme, bei gleichen Ladeverhalten, nicht mehr in das Netz integriert werden können, da sonst die Betriebsführung des Netzes nicht mehr gewährleistet werden kann. Somit besteht ein Bedarf an einer Verringerung der Ladeleistung, die das elektrische Netz für die einzelnen Ladeeinheiten zur Verfügung stellen muss.

Diese beiden für die Energieversorgung interessanten Fragestellungen sollen mit Hilfe eines stationären Speichersystems beantwortet werden. Mit Hilfe dieses Systems sollen zum einen Energieüberschüsse von Zeitintervallen aufgenommen werden, an denen eine Ladung der Elektroautos nicht möglich ist. Somit kann gezielt zu Zeitpunkten eines hohen Anteils erneuerbar erzeugter Energie geladen werden. Diese steht dann für Ladezeitpunkte zur Verfügung, bei denen das Angebot dieser Energie nicht groß ist. Es soll sich so eine deutliche Steigerung des ökologisch günstigeren Energieanteils ergeben.

Zum anderen soll die Belastung am Anschlusspunkt mit dem Energiespeicher deutlich verringert werden. Durch die somit potentiell mögliche Aufteilung der Ladeleistung besteht theoretisch die Chance die Netzbelastung zu halbieren. Ziel ist es somit, das Potential für die Integration von Ladesystemen in das betrachtete elektrische Netz zu erhöhen, oder die Netzausbaukosten für geeignete Szenarien zu verringern.

Im weiteren Verlauf des Projektes steht zunächst eine grundsätzliche Konzeptionierung des Systems bevor. So muss die Art, die Größe und der Standort des Speichersystems analysiert und bestimmt werden. Nach dem erfolgreichen Aufbau des Systems erfolgt die Einbindung des Speichers in die Ladesteuerung. Anhand der Daten über die Ladevorgänge und das Betriebsverhalten soll die Steuerung des Speichersystems in den Testphasen des Mobilitätskonzepts optimiert werden. Aus den Daten ergibt sich zuletzt eine Betrachtung zur ökonomischen und ökologischen Bewertung der Speichereinheit. Diese soll auf Ihre Relevanz für andere elektrische Netze untersucht werden.



## 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.

Die Durschlagprozesse sind bis heute für die meisten Spannungsarten (Gleich-, Wechsel- und Schaltstoßspannung) relativ gut erforscht. Für die Blitzstoßspannung ist deren Erforschung aufgrund der damals existierenden Messtechnik weniger weit fortgeschritten. Beschränkend war hierbei das Aufzeichnungsvermögen der Messtechnik gegenüber den relativ schnell ablaufenden Prozessen bei der Blitzstoßspannung. Durch die Entwicklung der Messtechnik der letzten Jahre ist es möglich geworden, die Prozesse des Entladeverhaltens bei einer Blitzstoßspannung zu erfassen. Im Rahmen der Arbeit von Shirvani [1] konnte erstmals das Durschlagverhalten 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.

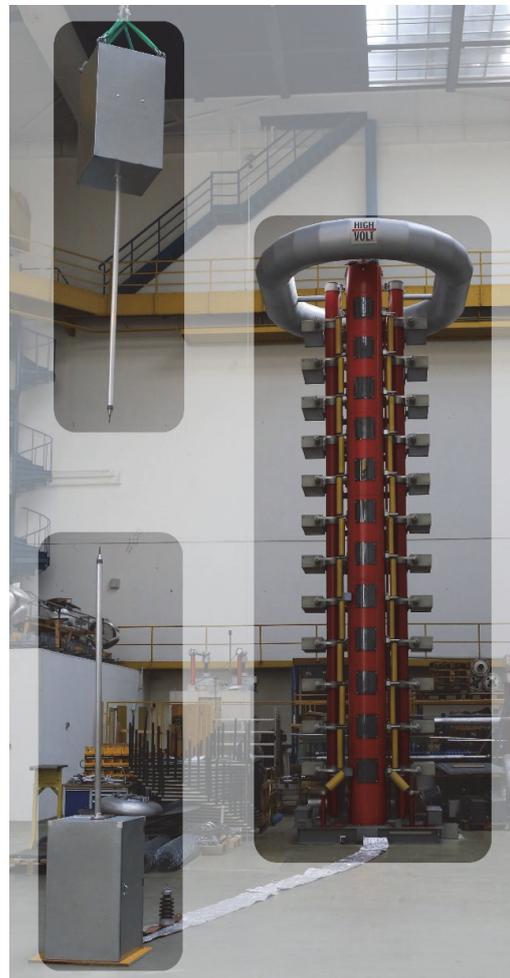


Abb. 1: Messanordnung zur synchronen Erfassung der Vorentladeströme beidseitiger Elektroden

Für den realen Anwendungsfall des rückwärtigen Überschlags bedarf es weiterer Forschung. 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.

Für diese symmetrische Elektrodenanordnung kann nicht explizit genannt werden, von welcher Elektrode die Entladungen beginnen bzw. welche den höchsten Einfluss auf das Entladungsverhalten bei einem Durchschlag hat. Aus diesem Grunde bedarf es an beiden Seiten der Elektroden eine gleichzeitige 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. So lässt sich der Einfluss beider Seiten auf den Durchschlagprozess ermittelt.

In den beiden Gehäusen (Abbildung 1) sind Messgeräte, Ansteuergeräte und eine autarke Spannungsversorgung enthalten. Um hohe Messgenauigkeiten zu erzielen, werden Oszilloskope hoher Abtastraten und Frequenzbandbreite genutzt. Die Messgeräte werden von der Ferne in Betrieb genommen und gesteuert. Neben der synchronen Strommessungen und der Messung der Spannung, konnten durch eine Kamera (digitale Spiegelreflexkamera mit einem Vollformat-Sensor hoher Sensorempfindlichkeit) die Entladungsphänomene für die Gewinnung erster Erkenntnisse mittels Einzelbildaufnahmen (Belichtungszeiten 3 – 4 Sekunden) aufgenommen werden.

Eine große Herausforderung stellte dabei die Messung des Stromes auf Hochspannungspotential dar. An den Kanten des Metallgehäuses entstehen unerwünschte Entladungen, deren Einfluss auf das Entladungsverhalten der Spitze-Spitze-Elektrodenanordnung zu minimieren ist. Das gelingt durch ausreichend lange Zuführungsrohre, in die Spitzenelektroden integriert sind. Eine synchrone Messung der Vorentladeströme an beiden Enden der Spitzen-Elektroden ist beispielhaft der Abbildung 2 zu entnehmen.

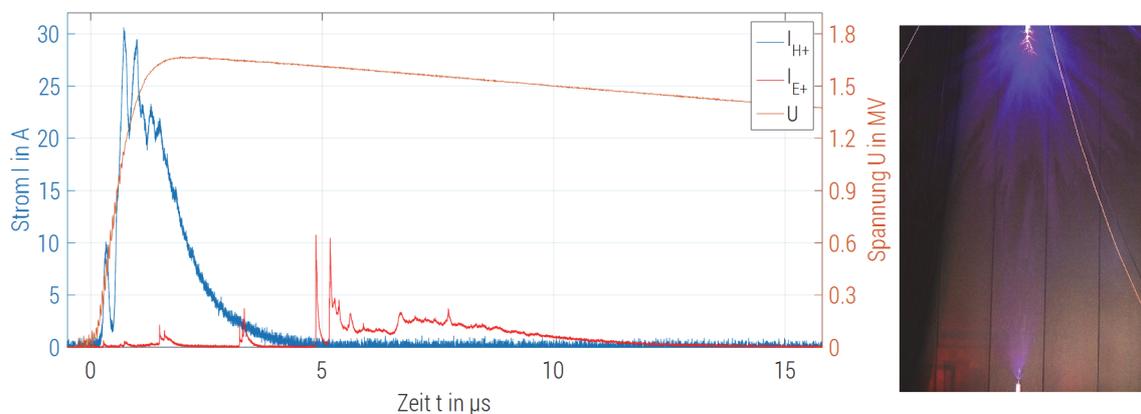


Abb. 2: Synchrone Messung von Strömen ( $I_{H+}$  – Strom am Hochspannungspotential,  $I_{E+}$  – Strom am Erdpotential,  $U$  – Spannung)

In der Abbildung 2 sind zum einen die Stromverläufe beider Elektroden und zum anderen der Spannungsverlauf zu beobachten, deren Verlauf miteinander synchronisiert wurde. Der Synchronisationsfehler liegt dabei unter 5 ns. Die Messung wurde bei einem Elektrodenabstand von 3 m aufgenommen, bei dem kein Durchschlag eingetreten ist. Die Höhe der Spannung betrug 1.670 kV.

- [1] Shirvani-Boroujeni, A.: Ein Beitrag zum Entladungsverhalten langer Luftfunkenstrecken bei Blspannung. Technische Universität Chemnitz. Dissertation, 2014
- [2] Gürlek, A.; Shirvani A. ; Malekian, K. ; Schufft, W.: Breakdown Process of long Air Gaps on Rod-F Electrodes by Lightning Voltages. 19th International Symposium on High-Voltage Engineering, sen, 2015. ISBN 978-80-261-0476-6
- [3] Gürlek, A.; Ghasem, N. ; Shirvani A. ; Schufft, W.: A Measurement System to investigate the Bre down Process of Lightning Impulses on the Rod-Rod Electrode. 19th International Symposium High-Voltage Engineering, Pilsen, 2015. ISBN 978-80-261-0476-6



## Frequenzabhängigkeit des Verlustfaktors an VPE-isolierten Mittelspannungskabeln

M. Sc. Suleiman Hadid

Die elektrische Energieversorgung ist zurzeit geprägt vom Wachstum erneuerbarer Energien und dezentraler Energieversorgung. Neue Netzstrukturen für eine bedeutende Erhöhung der Übertragung und Verteilung der elektrischen Energie werden zukünftig erforderlich sein.

Infolge der zunehmenden Belastung von Kabelnetzen, ist die Kenntnis über den integralen Zustand von Kabelsystemen und Kabelstrecken mit Kabelgarnituren notwendig. Des Weiteren ist eine Konzeption von elektrischen Betriebsmitteln und der dazugehörigen Anlagen für eine lange Lebensdauer notwendig, um einen störungsfreien Betrieb über einen längeren Zeitraum gewährleisten zu können.

Zur Vermeidung von Übertragungsausfällen an Elektroenergie müssen die Netzbetreiber eine Wartung der Kabelnetze in regelmäßigen Abständen durchführen. Durch frühzeitige diagnostische Untersuchungen der Kabelsysteme können Ausfälle durch betriebsgealterte Kabel minimiert bzw. vermieden werden. Aus diesem Grund besteht seit Jahren ein großer Forschungsbedarf im Bereich der Kabeldiagnose an Mittelspannungskabeln. Es entwickelten sich hierfür unterschiedliche Prinzipien. Ein Messverfahren, welches zur integralen Kabeldiagnose gehört, ist die Verlustfaktormessung. Hierbei ist der Verlustfaktor  $\tan \delta$ , auch Tangens Delta genannt, ein Maß für die im Kabel durch Leitfähigkeit und Polarisation auftretenden ohmschen Verluste. Eine Veränderung des Verlustfaktors wird hauptsächlich durch die globale Alterung des Kabels hervorgerufen. Ziel der Arbeit ist es, zusätzliche Informationen anhand der Verlustfaktormessung an VPE-isolierten Mittelspannungskabeln zu generieren. Die zentrale Fragestellung ist daher: Sind die gewonnenen Kenntnisse brauchbar zur Mittelspannungskabeldiagnose?

### Grundlagen

Für eine zuverlässige Mittelspannungskabeldiagnostik ist es notwendig, dass die Basisdaten einer Kabelstrecke, wie Kabeltyp, Fertigungsjahr, Legebedingungen, Betriebszeit und Betriebsbedingungen bekannt sind. Weiterhin ist wichtig, dass die gemessenen Kenngrößen auswertbar sind und zum geprüften Objekt gehören, das heißt, ein Messfehler durch Störgrößen bzw. Fehler in der Messschaltung ausgeschlossen sein soll.

Zusätzlich gilt, dass je mehr Informationen aus einer Messung gewonnen werden, desto genauer bilden die resultierenden Aussagen die Realität des Kabelzustandes ab. Der Verlustfaktor an VPE-isolierten Mittelspannungskabeln ist von verschiedenen Parametern und Einflüssen abhängig. Um aussagekräftige Informationen durch die Verlustfaktormessung zu erhalten, sollten die Messergebnisse einerseits reproduzierbar sein und andererseits eine zeitliche Tendenz der betrieblichen Alterung des Kabels zeigen.

### Ergebnisse der Messungen an Mittelspannungskabeln

Im Rahmen der Untersuchungen wurden an neuwertigen und betriebsgealterten VPE-isolierten Mittelspannungskabeln unterschiedlicher Kabelhersteller Verlustfaktormessungen bei 50 Hz in Abhängigkeit der Spannung sowie in einem Frequenzbereich [0,001 - 1000] Hz bei einem festen Spannungswert durchgeführt, sodass die Spannungs- und Frequenzabhängigkeit des Verlustfaktors berücksichtigt wurden. Bei

allen Messungen wurden parasitäre Ströme durch einen Schutzring eliminiert. Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Verlustfaktormessung wurden für jede Kabelprobe mehrere Messungen durchgeführt.

Im Hochspannungslabor wurden zunächst Verlustfaktormessungen bei 50 Hz vorgenommen, wobei die Spannung in 1-kV-Schritten von 1 kV bis  $2 U_0$  erhöht wurde. Die Ergebnisse sind in Abbildung 1 dargestellt.

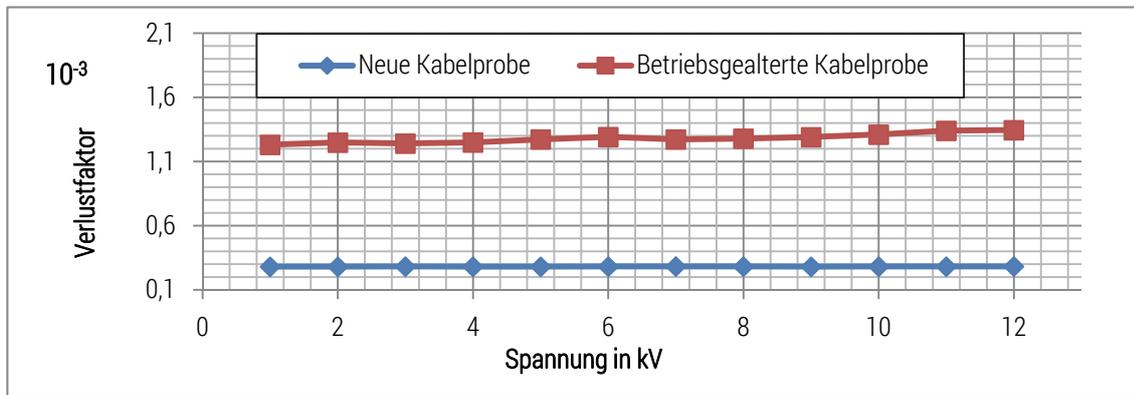


Abb. 1: Verlustfaktor bei 50 Hz an neuen und betriebsgealterten 10 kV VPE-Mittelspannungskabeln

Die Verlustfaktorwerte von betriebsgealterten Kabelproben sind deutlich höher als jene von neuen Kabelproben, wobei eine Spannungsabhängigkeit des Verlustfaktors nicht erkennbar ist, da der Verlustfaktor bei Spannungssteigerung konstant bleibt. Die geringfügige Abweichung kann aufgrund der Genauigkeit des Messgerätes vernachlässigt werden. Anhand der gemessenen Werte bei nur einem Frequenzwert konnte lediglich ein Vergleich zu neuen Kabeln durchgeführt werden. Dies verlangt jedoch einen Referenzwert für jedes Kabel und gleiche Randbedingungen bei jeder Verlustfaktormessung. Mit dieser Messmethode sind Alterungsursachen und Störeinflüsse schwierig zu erkennen. Da nachweislich keine Spannungsabhängigkeit des Verlustfaktors festzustellen ist, wird es notwendig, an andere Kriterien zu forschen, bei denen mehr Informationen aus der Messung herausgearbeitet werden können. Daher ist die Betrachtung der Frequenzabhängigkeit des Verlustfaktors unabdingbar.

Die Abbildung 2 zeigt die Messergebnisse der frequenzabhängigen Verlustfaktormessung, sowie die Verteilung der Messwerte bei 50 Hz an gleichen Kabelproben.

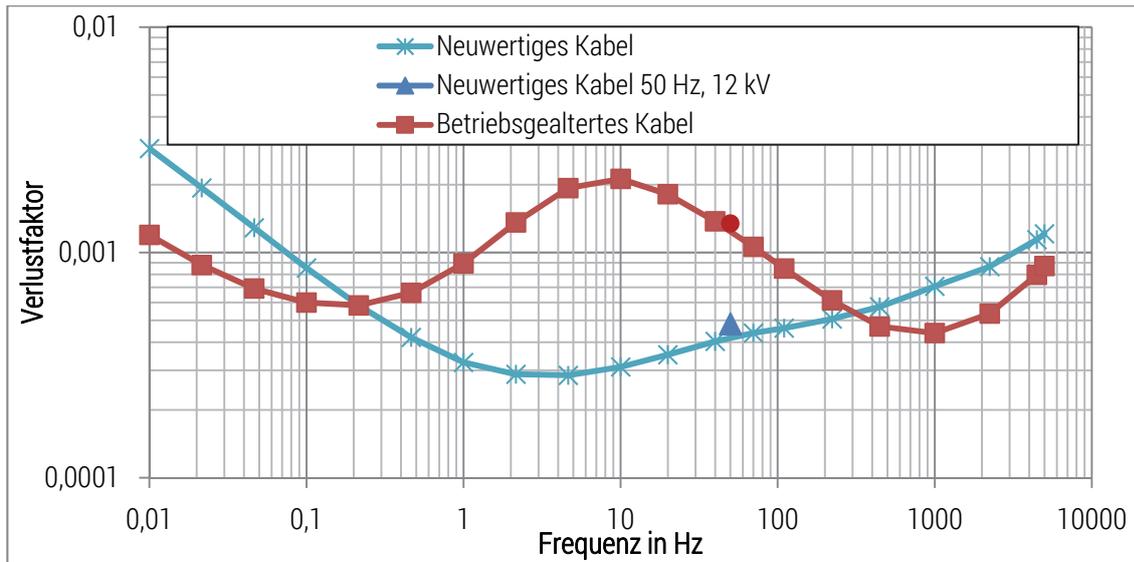


Abb. 2: Verlustfaktormessung an neuen und betriebsgealterten 10 kV VPE-Mittelspannungskabeln

Der Verlauf des Verlustfaktors an neuen VPE-isolierten Mittelspannungskabeln weist eine V-Form auf und lässt sich durch zwei Geraden approximieren, welche die Leitfähigkeiten der Isolierung und der beiden Leitschichten repräsentieren. Bei der Betriebsfrequenz (50 Hz) wird der Verlustfaktor neuwertiger Kabel überwiegend durch die Leitfähigkeit der Leitschichten bestimmt. Im Gegensatz dazu wird der Verlustfaktor betriebsgealterter Kabel von der Leitfähigkeit der Hauptisolierung sowie der Wirkung von Polarisationsseffekten dominiert, was sich durch eine Verschiebung des Minimums in beide Richtungen bzw. durch das Auftreten von Maxima äußert. Für eine Prüf- bzw. Diagnosefrequenz von 0,1 Hz gilt der Einfluss der Leitfähigkeit der Hauptisolierung auf den Verlustfaktor als dominierend. Die Leitschichten haben entsprechend einen nur geringen Einfluss. Anhand der Verlustfaktorwerte bei 0,1 Hz existiert kein nennenswerter Unterschied zwischen neuwertigen und betriebsgealterten Kabeln. Bei Frequenzen über 200 Hz und bis 5 kHz überwiegen die dielektrischen Verluste der Leitschichten.

Die Resultate der Verlustfaktormessung bei 50 Hz und der FDS-Analyse (DIRANA) stimmen für die jeweiligen Kabelproben überein. Die beobachtbare Abweichung stellt sich dabei als vernachlässigbar klein dar und kann durch mehrmalige Wiederholungsmessungen weiter minimiert werden. Es kann somit festgestellt werden, dass beide Messverfahren in etwa übereinstimmende Ergebnisse liefern und zudem keine Spannungsabhängigkeit besteht.

Bei Verlustfaktormessungen in einem hohen Frequenzbereich lässt sich im Vergleich zu heute üblichen Messungen mit einer definierten Frequenz (0,1 Hz oder 50 Hz) generell eine höhere Informationsqualität gewinnen. Dies erlaubt eine höhere Aussagekraft bezüglich der Zustandsbewertung. Weiterhin sind durch die Ermittlung eines kabelspezifischen Verlaufs des Verlustfaktors erstmals Aussagen über die zukünftige Entwicklung des Verlustfaktors möglich.



**Frequenzabhängige Modellierung von Kabeln für die Simulation transienter Vorgänge im Zeitbereich**

Ba. Sc. Abdullah Hoshmeh

Zur Simulation elektromagnetischer transienter Vorgänge in Kabeln ist ein Mindestmaß an Genauigkeit von Berechnungen notwendig. Diese transienten Vorgänge können u.a. durch Blitzeinschläge oder Schaltvorgänge verursacht werden. Um eine ausreichend hohe Genauigkeit zu erreichen, ist ein Modell mit einer Nachbildung des Verhaltens von Kabelparametern über einen definierten Frequenzbereich erforderlich.

Die Modellierung von Kabeln kann mit Hilfe von  $\pi$ -Gliedern erreicht werden. Abbildung 1 zeigt ein  $\pi$ -Glieder ohne Berücksichtigung der Frequenzabhängigkeit von Kabelparametern. In der Abbildung sind die Hauptelemente in Längsparameter ( $R$  und  $L$ ) und Querparametern ( $C$  und  $G$ ) eingeteilt.

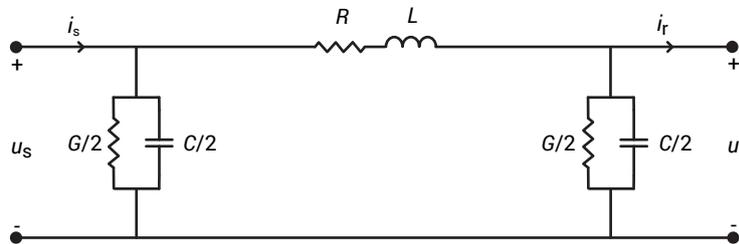


Abb. 1: Ein  $\pi$ -Glieder ohne Frequenzabhängigkeit

Die Frequenzabhängigkeit der Querparameter kann vernachlässigt werden. Allerdings sind die Längsparameter stark frequenzabhängig [1]. Demzufolge muss die Frequenzabhängigkeit von Längsparametern in einem Kabelmodell berücksichtigt werden.

In Abbildung 2 wird ein  $\pi$ -Glieder mit Berücksichtigung der Frequenzabhängigkeit von Längsparametern dargestellt. Das Kabelverhalten wird durch Kaskadierung mehrerer dieser  $\pi$ -Glieder nachgebildet. Wobei die Anzahl von  $\pi$ -Gliedern hauptsächlich von der Kabellänge abhängt.

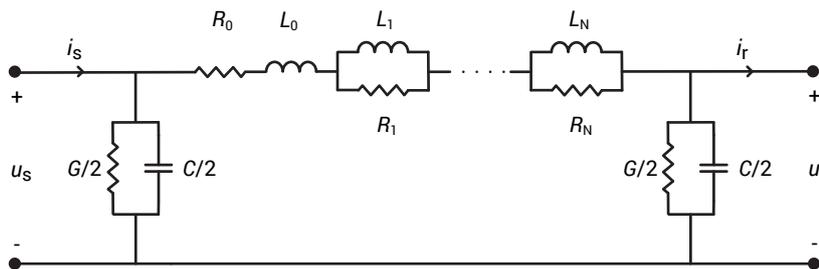


Abb. 2: Ein  $\pi$ -Glieder mit Frequenzabhängigkeit

Um das  $\pi$ -Glieder-Kabelmodell im Zeitbereich zu verifizieren, wurde ein DC-Test auf einer 20 kV-Kabelstrecke durchgeführt. Die Testkonfiguration wird in Abbildung 3 aufgezeigt. Für den Test wurde das Kabel einpolig auf 5 kV aufgeladen. Im Anschluss wurde der aufgeladene Leiter durch den Leistungsschalter (c) geerdet und der durchflossene Strom am Kabelanfang (s) gemessen.

Die Ergebnisse des  $\pi$ -Glieder-Kabelmodells mit 500  $\pi$ -Gliedern und die Ergebnisse des Kabelmodells von J-Marti, welches im Software ATP verwendet wird, werden mit dem gemessenen Strom (i) in Abbildung 4

verglichen. Die Simulation mit ATP erfolgte mit Berücksichtigung der Leitschichten. In der Simulation mit beiden Modellen wurde der gleiche Zeitschritt ( $\Delta t = 10^{-7}$  s) verwendet.

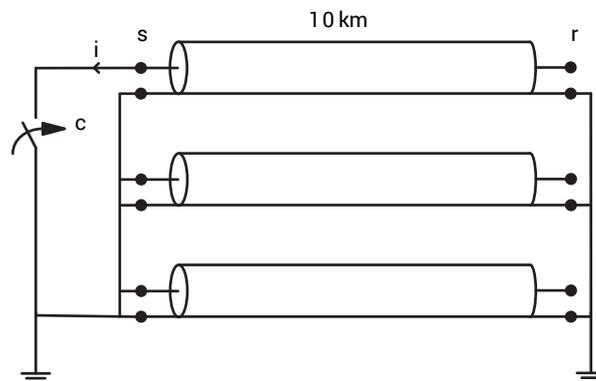


Abb. 3: DC-Testkonfiguration

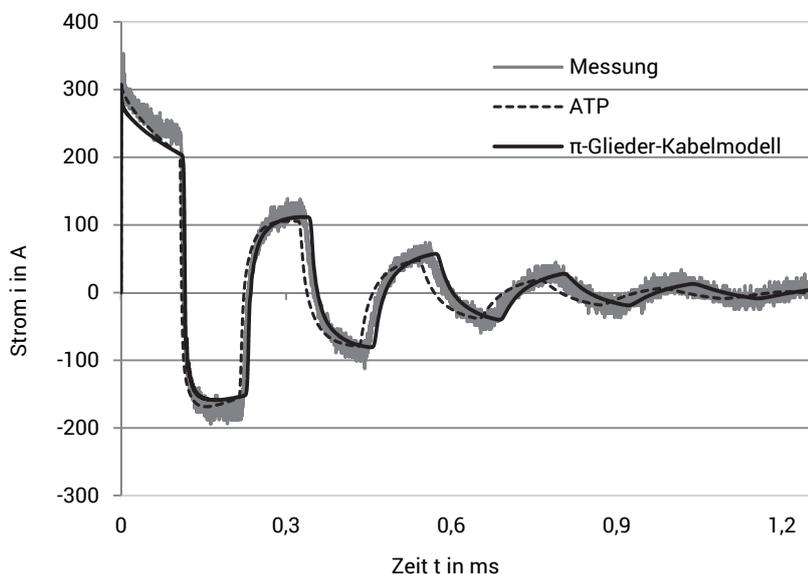


Abb. 4: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Strom

In dieser Simulation sollten zwei Fakten richtig nachgebildet werden:

- Laufzeit der Wanderwellen: Die Laufzeit des Impulses von einem Kabelende zum anderen ist in beiden Modellen nicht exakt modelliert. Allerdings liegt die Laufzeit vom  $\pi$ -Glieder-Kabelmodell näher zum gemessenen Strom (i).
- Dämpfung der Wanderwellen: Die Dämpfung ist im  $\pi$ -Glieder-Kabelmodell gut nachgebildet. Im Vergleich zum gemessenen Strom hat das Kabelmodell in ATP eine größere Dämpfung.

Der vorherige Vergleich zeigt, dass das  $\pi$ -Glieder-Kabelmodell eine bessere Übereinstimmung mit der Messung aufweist, welches die Gültigkeit des  $\pi$ -Glieder-Kabelmodells beweist.

Für die Simulation dreiphasiger transients Vorgänge ist eine weitere Entwicklung für das  $\pi$ -Glieder-Kabelmodell notwendig und wird im Folgenden angestrebt.

- [1] Hoshmeh. A, Malekian. K, Schufft. W, Schmidt. U, "A single-phase cable model based on lumped- $\pi$  parameters for transient calculations in the time domain," *15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC 2015)*, pp. 731-736, Rome, June 2015.



## Wechselwirkung zwischen Windpark und Netz – Beurteilung des Oberschwingungsverhaltens von Windparks

M. Sc. Kaveh Malekian-Boroujeni

Für die Beurteilung des Oberschwingungsverhaltens von Windparks werden in den meisten Normen Grenzwerte für die Oberschwingungsströme am Netzanschlusspunkt definiert, wohl wissend, dass die resultierenden Oberschwingungsspannungen und -ströme am Netzanschlusspunkt der Windparks teils durch die Windparks und teils durch das Netz erzeugt werden. Diesbezüglich wird ein neuer Ansatz vorgestellt, mit dem die Wechselwirkung zwischen dem Windpark und dem Netz analysiert werden kann. Dieser Ansatz wird in [1] ausführlich vorgestellt. Nachfolgend wird ein Auszug aus der Arbeit vorgestellt.

Zur Untersuchung der Wechselwirkung zwischen dem Windpark und dem Netz werden sowohl der Windpark als auch das Netz durch ihre Thévenin-Ersatzschaltbilder nachgebildet. Abbildung 1 stellt das Gesamtsystem beispielhaft für das Mitsystem dar.

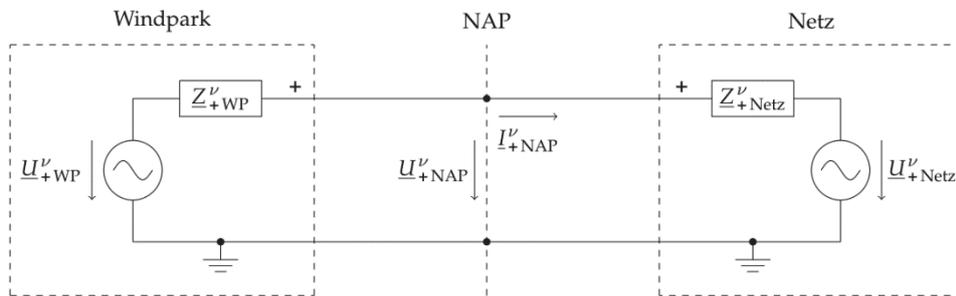


Abb. 1: Ersatzschaltbild des Gesamtsystems

Der entwickelte Ansatz benötigt als Eingangsdaten:

- Ersatzimpedanz der Windpark- und Netzseite ( $\underline{Z}_{s\text{ WP}}^v$  und  $\underline{Z}_{s\text{ Netz}}^v$ )
- Gemessene Spannungen und Ströme am Netzanschlusspunkt

Der Kern dieses Ansatzes ist, das Spannung-Strom-Verhältnis  $(\underline{U}/\underline{I})_{s\text{ NAP}}^v$  zur Untersuchung der Wechselwirkung zwischen dem Windpark und dem Netz zu verwenden. Das Spannung-Strom-Verhältnis lässt sich wie folgt für symmetrische Komponenten aus Messdaten ermitteln:

$$(\underline{U}/\underline{I})_{o\text{ NAP}}^v = \frac{U_{o\text{ NAP}}^v}{I_{o\text{ NAP}}^v} \quad (\underline{U}/\underline{I})_{+\text{ NAP}}^v = \frac{U_{+\text{ NAP}}^v}{I_{+\text{ NAP}}^v} \quad (\underline{U}/\underline{I})_{-\text{ NAP}}^v = \frac{U_{-\text{ NAP}}^v}{I_{-\text{ NAP}}^v}$$

Das Ziel ist, aus den Spannung-Strom-Verhältnissen  $(\underline{U}/\underline{I})_{s\text{ NAP}}^v$  auf das Verhältnis der Ersatzspannungsquellen der Windpark- und Netzseite  $\underline{R}_s^v$  zu schließen.

$$\underline{R}_o^v = \frac{U_{o\text{ Netz}}^v}{U_{o\text{ WP}}^v} \quad \underline{R}_+^v = \frac{U_{+\text{ Netz}}^v}{U_{+\text{ WP}}^v} \quad \underline{R}_-^v = \frac{U_{-\text{ Netz}}^v}{U_{-\text{ WP}}^v}$$

Hierbei werden zunächst folgende Extremfälle vorgestellt:

- Extremfall I – Die Oberschwingungen am Netzanschlusspunkt werden im Wesentlichen von der Netzseite emittiert ( $\underline{R}_s^v \rightarrow \infty$ ). In diesem Fall nähern sich die Spannung-Strom-Verhältnisse  $(\underline{U}/\underline{I})_{s\text{ NAP}}^v$  dem negativen Wert der Windpark-Ersatzimpedanz an (d.h.  $(\underline{U}/\underline{I})_{s\text{ NAP}}^v \rightarrow -\underline{Z}_{s\text{ WP}}^v$ ).
- Extremfall II – Die Oberschwingungen am Netzanschlusspunkt werden überwiegend von der Netzseite emittiert ( $\underline{R}_s^v \rightarrow 0$ ). In diesem Fall nähern sich die Spannung-Strom-Verhältnisse  $(\underline{U}/\underline{I})_{s\text{ NAP}}^v$  der Netz-Ersatzimpedanz an (d.h.  $(\underline{U}/\underline{I})_{s\text{ NAP}}^v \rightarrow \underline{Z}_{s\text{ Netz}}^v$ ).

Aus diesen Extremfällen werden zwei Gruppen von Hilfslinien extrahiert, anhand deren sich die Spannung-Strom-Verhältnisse  $(\underline{U}/\underline{I})_{s, \text{NAP}}^v$  interpretieren lassen. Die Hilfslinien sind beispielhaft für das Mitsystem anhand exemplarische Windpark- und Netzimpedanzen in Abbildung 2 veranschaulicht. Es können nun Aussagen sowohl bezüglich des Betrags der Ersatzspannungsquellen der Windpark- und Netzseite als auch bezüglich der Phasenwinkeldifferenz zwischen diesen Quellen getroffen werden.

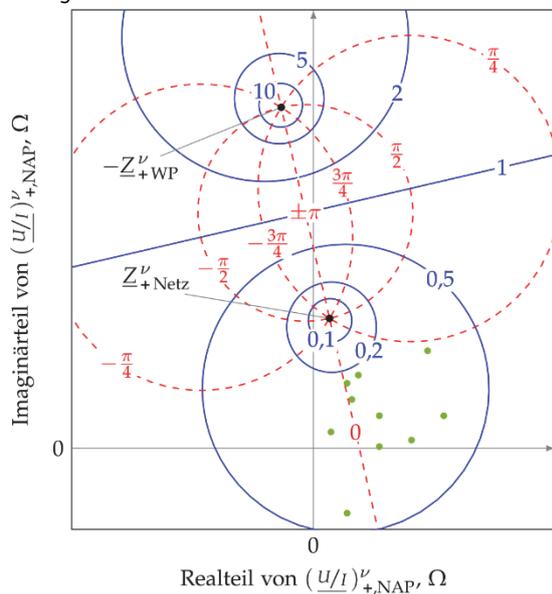


Abb. 2: Erste und zweite Gruppe der Hilfslinien zur Analyse des Verhältnisses der Ersatzspannungen  $\underline{R}_s^v$  (durchgezogene blaue Linien:  $|\underline{R}_+^v| = k$ , gestrichelte rote Linien:  $\text{arg}(\underline{R}_+^v) = k$ , grüne Punkte: gemessene Spannung-Strom-Verhältnisse  $(\underline{U}/\underline{I})_{+, \text{NAP}}^v$ )

Anschließend wird der Ansatz zur Untersuchung der vom Windpark verursachten Änderung der Oberschwingungsspannungen am Netzanschlusspunkt erweitert. Hierfür werden zwei weitere Extremfälle und die dazu gehörenden Hilfslinien hergeleitet und vorgestellt. Mithilfe der Hilfslinien werden aus den Spannung-Strom-Verhältnissen  $(\underline{U}/\underline{I})_{s, \text{NAP}}^v$  Rückschlüsse auf den Einfluss des Windparks bezüglich des Betrags und Phasenwinkels der Oberschwingungsspannungen am Netzanschlusspunkt gezogen.

- [1] Kaveh Malekian: A novel approach to analyze the harmonic behavior of customers at the point of common coupling. In: 9th International Conference on Compatibility and Power Electronics, Lissabon, 2015.



## Untersuchungen zu Störeinflüssen auf die Verlustfaktormessung und ihrer Reproduzierbarkeit

M. Sc. Ghasem Nourirad

Seit dem Beginn der Elektroenergieversorgung hat sich der Bestand an Kabeln kontinuierlich erhöht, weshalb sich deren volkswirtschaftliche Wertschöpfung heute in einem hohen Investitionsbereich bewegt. Der Ausfall an Elektroenergie durch ein Defekt des Kabels bzw. der Betriebsmittel der Elektroenergieversorgung können bei kritischen Industrieprozessen erhebliche Kosten verursachen. Um die Versorgungszuverlässigkeit der Energieversorgung auch weiterhin auf einem sehr hohem Niveau zu halten und um einen nachhaltigen Umgang mit diesen hohen Kosten- und Investitionsvermögen zu ermöglichen, ist die Kenntnis über den Zustand dieses Kabelbestands von hoher Bedeutung. Auf diese Weise wird es möglich, einen gezielten Austausch von Kabeln noch vor Eintreten eines Defekts durchzuführen. Jedoch wird ein vorzeitiger Austausch nicht praktiziert, da bislang keine belastbaren Modelle bzw. die Kenntnis zur zuverlässigen Prognose bezüglich eines Defekts existieren. Dies ist damit begründet, dass sich die statistische Ausfallrate einzelner Kabel je nach Betriebsweise, Verlegung und Kabeltyp deutlich unterscheidet [1-3].

Zur Bestimmung des integralen Zustandes existieren verschiedene Methoden. Dazu zählt unter anderem die Verlustfaktormessung. Der dielektrische Verlustfaktor (auch  $\tan \delta$  genannt) ist eines der wichtigen Kriterien zur Beurteilung des Isolierungszustandes von Betriebsmitteln. In der Vergangenheit wurde der Verlustfaktor nur bei einer diskreten Prüffrequenz bei  $f = 50 \text{ Hz}$  oder bei  $f = 0,1 \text{ Hz}$  ermittelt. Dabei wurde der Einfluss der Spannung auf den Verlustfaktor ohne Berücksichtigung der Frequenzabhängigkeit untersucht. Diese Methode ließ dementsprechend eine sachgerechte Beurteilung des Isolierungszustandes nicht zu.

Es wurden bereits erste Untersuchungen bei der elektrischen Alterung von VPE-isolierten Kabeln durchgeführt. Hierbei wird eine 10-kV-Kabelstrecke mit der doppelten Spannung (20 kV) betrieben [4]. Dieser ist bereits seit 2001 in Betrieb. Abbildung 1 zeigt die Messergebnisse des Verlustfaktors bei einer dreiphasigen Kabelstrecke ( $L_1, L_2, L_3$ ). Wie aus Abbildung 1 ersichtlich, schwankt der Wert des Verlustfaktors über die vergangenen 13 Jahre. Diese ist u. a. von der Temperatur und Erdfeuchte abhängig, welche in den vorausgegangenen Messungen nicht berücksichtigt wurde.

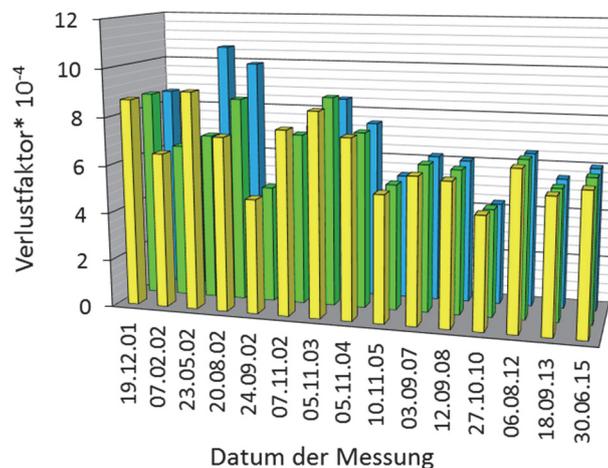


Abb. 1.: Verlustfaktormessung an Kabelstrecke

Es sei zu erwähnen, dass der Verlustfaktor sich in einem Bereich zwischen  $10^{-4}$  und  $10^{-2}$  bewegt. Ein neues Kabel weist einen niedrigen Verlustfaktor von  $10^{-4}$  auf. Wohingegen ein gealtertes Kabel einen Verlustfaktor von  $10^{-2}$  aufweist. Aus diesem Grund spielen kleine Änderungen des Verlustfaktors eine große Rolle in der Diagnose der Kabel. Es ist wichtig darauf hinzuweisen, dass Verlustfaktormessungen aufgrund ihrer Einflussgrößen nicht zuverlässig reproduzierbar sind.

Das Hauptziel der Arbeit besteht darin, die Einflüsse bei der Verlustfaktormessung zu ermitteln, um die Reproduzierbarkeit der Messungen zu erlangen. Es ist u. a. die Abhängigkeit des Verlustfaktors von der Temperatur während der Messung zu erarbeiten. Weiterhin soll der Einfluss durch Wassereinlagerung in der Isolierung und der Einfluss der thermischen Alterung auf den Verlustfaktor untersucht werden.

Im Allgemeinen zeigt der Verlustfaktor ein stark frequenzabhängiges Verhalten im Frequenzbereich zwischen 0,0001 Hz und 5000 Hz. Diese bedingt, dass bisherige Messungen bei einem einzelnen Frequenzwert nicht ausreichend sind. Es wird angestrebt, die Messungen in Abhängigkeit der Frequenz für den oben genannten Bereich durchzuführen.

- [1] P. Werelius, R. Eriksson, B. Holmgren, U. Gäfvert and L. Olsson, "XLPE cable insulation diagnosis by measurement of dielectric losses as a function of frequency and voltage" CIREN, paper 3.06, Brussels, 1995.
- [2] Eriksson, R.; Werelius, P.; Adeen, L.; Johansson, P.; Flodqvist, Henrik, "Condition based replacement of medium voltage cables saves millions-case study Botkyrka," Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna , vol.2, no., pp.5 pp. Vol.2., 23-26 June 2003.
- [3] Ohlen, Matz, and Peter Werelius. "Dielectric frequency response and temperature dependence of power factor." Electrical Insulation (ISEI), Conference Record of the 2010 IEEE International Symposium on. IEEE, 2010.
- [4] Schufft, W., Schreiter, F., Jilek, U.: Kombination von diagnostischen Messungen und Stehspannungsprüfungen zur Ermittlung der Isolationsreserven von verlegten Mittelspannungskabeln. HIGHVOLT Kolloquium '03, 22./23.05.03 Dresden

## 5 Abgeschlossene wissenschaftliche Arbeiten

Auch im Jahr 2015 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/studentischearbeiten.php>

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

### 5.1 Bachelorarbeiten

Frank Zinecker	Optimierung eines Tesla-Transformators
Tristan Philip Shane Fitzgibbon	Bewertung von Solarthermie und Photovoltaik zur Speicherung thermischer Energie
Georg Hoske	Simulation des Verlustfaktors unter Berücksichtigung unterschiedlicher Einflussfaktoren an VPE-Mittelspannungskabeln
Robert Knorr	Kostenanalyse eines autarken Energieversorgungssystems
Kai Jacob	Untersuchung zeitabhängiger Merkmale von Teilentladungen in Mittelspannungskabelmuffen und deren Differenzierbarkeit für relevante Montagefehler
Robert Blau	Abhängigkeit des saisonalen Speicherbedarfs vom solaren Energieangebot und der geographischen Lage
Stephan Ulle	Wirtschaftlichkeitsanalyse von Energiespeichern in Industrie und Gewerbe
Michael Würfel	Entwicklung einer mathematischen Spezifikation zur Charakterisierung von Leistungsschalter-Auslösekennlinien
Georg Franke	Zuverlässigkeitsberechnung von Netzen
Sven Hollnagel	Einsatz von Energiespeichersystemen in der Produktion
Kevin Krug	Messung und Vergleich des Entladungsverhaltens zwischen einer Spitze-Spitze-Elektrodenanordnung und einer Langstabisolator-kette

## 5.2 Masterarbeiten

Martin Berlit	Simulation des Ausfallverhaltens von Mittelspannungskabelstrecken und Optimierung der Instandhaltungsstrategie mit einem genetischen Algorithmus
Marc Teichmann	Power to Gas
Nikola Schörnig	Wertschöpfungsszenarien der zukünftigen Energieversorgung im motorisierten Individualverkehr für Deutschland im Jahr 2030
Tina Schirr	Elektroenergienetze im Prozess der Dezentralisierung – Potentialbewertung ausgewählter Gestaltungsmöglichkeiten mit Hilfe eines Scoring-Modells
Jens Brand	Bilanzielle Modellbildung von autarken anwendungsorientierten Eigenversorgungsanlagen für Entwicklungsländer
Mike Hoffmann	Phasengenaue Modellbildung des Magnetisierungsstromes dreiphasiger Transformatoren in Frequenzbereich
Sebastian Duda	Analyse und Konzeption von Crowdfunding als Finanzierungsinstrument für den Aufbau einer Elektromobilitätslösung in Kommunen
Erik Müller	Analyse des Einflusses der Ausgestaltung des Ersatzinvestitions- und Instandhaltungsprogrammes auf Netzzustandsparameter von Stromverteilnetzen
Kathrin Braun	Untersuchung und Modellierung des Oberschwingungsverhaltens von Transformatoren im Null- und Mitsystem im Frequenzbereich bis 1 kHz
Jeannette Hirtz	Wirtschaftlichkeitsanalyse von Niederspannungsnetzen durch Nachbildung ökonomischer Parameter in realen Netzmodellen

## 6 Veröffentlichungen und Konferenzbeiträge

Die im Jahr 2015 getätigten Veröffentlichungen und Konferenzbeiträge sind nachfolgend aufgeführt und können bei Bedarf auf unserer Homepage eingesehen werden.

**Schufft, W.; Schmidt, U. ; Malekian, K. ; Hoshmeh, A.:** *A Single-Phase Cable Model Based on Limped-Parameters for Transient Calculations in the Time Domain.* , 2015. 978-1-4799-7992-9

**Malekian, K:** *A Novel Approach to Analyze the Harmonic Behavior of Customers at the Point of Common Coupling.* Portugal / IEEE, 2015. DOL: 10.1109/CPE.2015.7231045

**Shirvani A:** *Ein Beitrag zum Entladungsverhalten langer Luftfunkenstrecken bei Blitzspannung.*, Dissertation, 2015. 978-3-944640-42-6

**Teuscher, J:** *Leistungsflussoptimierendes Energiemanagement von dezentralen Energieversorgungssystemen in zukünftigen Niederspannungsnetzstrukturen.* Universitätsverlag Chemnitz, Dissertation, 2015. ISBN: 978-3-944640-50-1

**Paulitschke, M.; Bocklisch, T. ; Böttiger, M.:** *Sizing algorithm for a PV-battery-H2-system employing particle-swarm-optimization.* 9. Internationale Konferenz zur Speicherung Erneuerbarer Energien IRES 2015, Eurosolar, Düsseldorf, 2015

**Böttiger, M.; Paulitschke, M. ; Bocklisch, T.:** *Optimizing model-based energy management for a photovoltaic battery system.* 9. Internationale Konferenz zur Speicherung Erneuerbarer Energien IRES 2015, Eurosolar, Düsseldorf, 2015

**Malekian, K.; Gürlek, A. ; Schufft, W.:** *Analysis and Modeling of Time-Varying Harmonics in Frequency Domain.* Portugal IEEE, 2015. DOL: 10.1109/CPE.2015.7231047

**Hadid, S.; Schufft, W.; Kühnert, M; Uhrig, S; Anglhuber, M:** *Investigations of the influence of semi-conductive shields on the frequency- dependent loss factor measurement of XLPE- insulated medium voltage cables.* 19th International Symposium on High-Voltage Engineering, Pilsen, 2015. ISBN 978-80-261-0476-6

**Hadid, S.; Schufft, W.; Uhrig, S; Anglhuber, M:** *Influence factors on the dielectric loss factor of XLPE insulated medium voltage cables.* 19th International Symposium on High-Voltage Engineering, Pilsen, 2015. ISBN 978-80-261-0476-6

**Gürlek, A.; Ghasem, N. ; Shirvani A. ; Schufft, W.:** *A Measurement System to investigate the Breakdown Process of Lightning Impulses on the Rod-Rod Electrode.* 19th International Symposium on High-Voltage Engineering, Pilsen, 2015. ISBN 978-80-261-0476-6

**Gürlek, A.; Shirvani A. ; Malekian, K. ; Schufft, W.:** *Breakdown Process of long Air Gaps on Rod-Rod Electrodes by Lightning Voltages.* 19th International Symposium on High-Voltage Engineering, Pilsen, 2015. ISBN 978-80-261-0476-6

**Shirvani A.; Gürlek, A. ; Malekian, K. ; Schufft, W.:** *An Analysis of the Lightning Breakdown and its Analogies to the Switching Breakdown.* 19th International Symposium on High-Voltage Engineering, Pilsen, 2015. ISBN 978-80-261-0476-6

**Teuscher, J.; Schufft, W.; Born, Björn:** *Ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeit an der TU Chemnitz Professur Energie und Hochspannungstechnik.* Universitätsverlag der Technischen Universität Chemnitz, 2015. ISBN: 978-3-944640-66-2

## 7 Externe Aktivitäten und Kontakte

### 7.1 Teilnahmen an Konferenzen, Tagungen, Kolloquien

Datum	Person	Veranstaltung	Ort
09.-11.03.2015	Bocklisch, Paulitschke, Böttiger	9. Internationale Konferenz zur Speicherung von Energie aus erneuerbaren Quellen, IRES2015	Düsseldorf
21.04.2015	Götz, Gürlek	POWERFACTORY Anwendertreffen	Dresden
06.05.2015	Schufft	BAUR Anwendertag	Mittweida
24.06.2015	Bocklisch, Böttiger	Energys Saxony Summit	Dresden
24.-26.06.2015	Malekian	9th International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE)	Lissabon, Portugal
02.07.2015	Bocklisch, Paulitschke, Böttiger	Solarspeicher-Symposium	Berlin
20.07.2015	Götz	SAENA-Fördermöglichkeiten für Elektromobilität	Dresden
24.-28.08.2015	Schufft, Gürlek, Kühnert	ISH Internationales Symposium für Hochspannungstechnik	Pilsen, Tschechien
17./18.09.2015	Teuscher	Wissenschaftsdialog BNetzA	Bonn
06.11.2015	Götz	Strategieforum Energieforschung in Sachsen	Dresden

## 7.2 Gäste an der Professur

Datum	Namen	Firma/ Institution
11.03.2015	Herr Dr. Leu	TU Ilmenau
02.04.2015	Herr Prof. Kornhuber	Hochschule Zittau
13.15.2015	Herr Fallant	Belelectric GmbH, Dresden
16.07.2015	Herr Prof. Rayan Abdullah	Hochschule für Grafik und Buchkunst Leipzig
14.10.2015	Herr Rudolph, Herr Rollmann, Herr Hartmann	R-Consult, Rollmann Elektronik, impellis
29.10.2015	Herr Berth, Herr Dr. Paulus	BAUR, Österreich
25.11.2015	Herr Dr. Barucki	Adapted Solutions
25.11.2015	Herr Rudolph, Herr Rollmann	R-Consult, Rollmann Elektronik
26.11.2015	Herr Dietrich, Herr Gurski, Herr Noske	MITNETZ
15.12.2015	Herr Dr. Heymann, Herr Schlemmer	DNV-GL, Dresden

## 7.3 Höhepunkte

### 7.3.1 Verteidigung der Dissertation von Dr.-Ing. Jens Teuscher am 05. März 2015

*„Leistungsflussoptimierendes Energiemanagement von dezentralen Energieversorgungssystemen in zukünftigen Niederspannungsnetzstrukturen“*

Gutachter: Prof. W. Schufft, TU Chemnitz  
Prof. B. Platzter, TU Chemnitz  
Prof. U. Rindelhardt, TU Chemnitz  
Beisitzer: Dr. Th. Barucki (adapted solutions)  
Dr. F. Holzapfel (inetz GmbH)

In seiner Dissertation beschäftigte sich Herr Dr. Teuscher mit einem möglichen Ansatz eines Energiemanagements von dezentralen Energieversorgungssystemen in Niederspannungsnetzen. Mit seiner Arbeit leistet Herr Dr. Teuscher einen wichtigen Beitrag zu den aktuellen Fragestellungen des Betriebs von Niederspannungsnetzen im Kontext des Energiemarktwandels.

Diese Dissertation widmet sich der Erarbeitung verschiedener Managementstrategien für ein leistungsflussoptimierendes Energiemanagement von dezentralen Energieversorgungssystemen in zukünftigen Niederspannungsnetzstrukturen. Als dezentrales Energieversorgungssystem ist dabei eine beliebige Kombination von Erzeuger-, Verbraucher- und Speichereinheiten zu sehen. Die Optimierung des Leistungsflusses auf Niederspannungsebene wird durch zwei Managementansätze untersucht. In einem verlustoptimierten Managementansatz stehen die bekannten Leitverluste, verursacht durch die wirksamen Leitungsresistenzen, im Fokus der Betrachtung. Durch einen zweiten Ansatz, dem clusterbasierten Managementansatz, wird nochmals eine Fokussierung auf die wirksamen Leitungsresistenzen durch eine Cluster-Bildung von Hausanschlüssen erreicht, welche nur durch geringe wirksame Leitungsresistenzen voneinander getrennt sind. Anhand realitätsnaher Netzabbildungen sowie unterschiedlicher Erzeuger- und Verbrauchersituationen wird der Einfluss eines solchen Energiemanagements auf die Integration dezentraler Erzeuger und der Leitverluste gezeigt sowie die Möglichkeit einer netzoptimierten Betriebsweise untersucht.

Wir gratulieren Herrn Dr. Teuscher herzlich und wünschen ihm eine glückliche und erfolgreiche Zukunft!



### 7.3.2 Fachexkursion zum Pumpspeicherwerk Niederwartha am 16.06.2015

Das Ziel der diesjährigen Exkursion war das Pumpspeicherwerk Niederwartha. Es befindet sich in den Dresdner Stadtteilen Cossebaude und Niederwartha.

Diesmal hatten wir eine kombinierte Exkursion gewählt – einen Teil mit dem Pkw und einen Teil mit dem Fahrrad.

Wir trafen uns 08:30 Uhr am Chemnitzer Hauptbahnhof mit unseren „Drahtesel“, wo sie in einen von Herrn Götz organisierten Transporter kamen und wir per Pkw in Richtung

Dresden aufbrachen. Unsere beiden Senioren, Professor Amft und Herr Breitfeld, waren auch wieder mit von der Partie. Wobei Professor Amft mit dem Pkw erst am Pumpspeicherwerk zu uns stieß, aber Herr Breitfeld (wie schon im vergangenen Jahr) mit seinem 3-Gang-Fahrrad nie den Anschluss verlor!

Gegen 10:00 Uhr trafen wir uns auf dem Lukasplatz in Dresden, wo unser Chef Professor Schufft zu uns stieß und uns als „Scout“ mit unseren Fahrrädern über die Prager Straße, an der Semperoper vorbei hin zum Elberadweg führte. Von da ging es elbabwärts durch eine landschaftlich reizvolle Gegend und idyllisch verträumte Dörfer bis hin zum Pumpspeicherwerk Niederwartha.

Dort wurden wir von einem pensionierten ehemaligen Mitarbeiter in Empfang genommen, der uns zunächst mit einem Vortrag über das Pumpspeicherwerk von der Entstehung (1927 – 1930) bis zur jetzigen „Faststilllegung“ informierte. Das Pumpspeicherwerk hat eine Nennleistung von 120 Megawatt, die von sechs Maschinensätzen erzeugt werden kann. Davon sind aber nur noch zwei in Betrieb! Niederwartha gehört zum Energieversorger Vattenfall.

Danach folgte eine Besichtigung des Betriebsgeländes, welches allerdings schon einen leichten gespenstigen Eindruck machte, da wir einen einzigen Mitarbeiter trafen. Niederwartha dient nur noch als Notkraftwerk bei Stromausfällen!

Danach fuhren wir noch ein Stück elbabwärts, überquerten dann die Elbe und fuhren mit unseren Rädern in Richtung Altkötzchenbroda. Dort angekommen kehrten wir im Gasthaus „Zur grünen Linde“ ein.



### 7.3.3 Bewilligung des Forschungsprojektes „ECoMobility – Vernetzte Elektromobilität“

Im September 2015 begann an der TU Chemnitz das Projekt ECoMobility. Das Projekt baut auf Vorarbeiten von fahrE auf, einem ebenfalls von der EU geförderten Projekt (2012 – 2014), welches ein alltagstaugliches innerbetriebliches Mobilitätsangebot auf Basis von Elektrofahrzeugen und Fahrrädern entwickelte und umsetzte. In zwei umfangreichen praktischen Testphasen wurden dabei die technische Realisierbarkeit, das Nutzungsverhalten sowie die Akzeptanz neuartiger Mobilitätskonzepte untersucht.

Das Forschungsprojekt ECoMobility führt diese Untersuchungen nun fort. Beteiligt sind die Professuren Allgemeine und Arbeitspsychologie, Arbeitswissenschaft und Innovationsmanagement, Energie- und Hochspannungstechnik, Nachrichtentechnik, Schaltkreis- und Systementwurf sowie Unternehmensrechnung und Controlling. An der interdisziplinären Forschergruppe beteiligen sich damit sechs Professuren aus vier Fakultäten. Das auf drei Jahre angelegte Projekt wird vom Europäischen Sozialfonds (ESF) durch die Europäische Union und den Freistaat Sachsen (Projekträger SAB – Sächsische Aufbaubank) mit 1.470.000 Euro gefördert.

Auf dem Weg zu einer ressourcenschonenden Gesellschaft mit einem reduzierten Ausstoß an sog. Treibhausgasen stellt der Mobilitätssektor einen wichtigen Faktor dar. Die Elektromobilität kann dazu einen wichtigen Beitrag leisten. Aufgrund der mit Elektrofahrzeugen verbundenen Randbedingungen (geringe Reichweite, fehlende Ladeinfrastruktur) wird dies kurz- und mittelfristig aber nur durch eine intelligente Vernetzung mit anderen Mobilitätsträgern, der Infrastruktur und der Verkehrsteilnehmer untereinander gelingen. Eine intelligente Vernetzung der Mobilitätsakteure inkl. der genutzten Infrastruktur bietet enormes Potenzial für die effektive, effiziente und nachhaltige Nutzung von knappen Ressourcen.

ECoMobility beschäftigt sich u.a. mit Anforderungen, Problemstellungen und innovativen Lösungsansätzen zur Vernetzung unterschiedlicher Mobilitätsträger (Fahrzeugflotte, E-Bikes, ÖPNV) in drei Schwerpunktbereichen: Im Bereich Human Factors soll die Frage beantwortet werden, wie Personengruppen mit unterschiedlichen Mobilitätsstilen durch Anreize gezielt zu sparsamem, situations- und energieangepasstem Mobilitätsverhalten innerhalb eines vernetzten Mobilitätskonzepts motiviert werden können. Auf ökologischer Seite werden innovative Lösungen zur Bereitstellung von Energie an Ladepunkten und zur effektiven Nutzung des Verkehrsraums erarbeitet, welche die gegenläufigen Anforderungen von gesteuertem Laden und geteilter Nutzung erfüllen. Im Schwerpunkt Ökonomie wird die Wirtschaftlichkeit zur Realisierung tragfähiger Geschäftsmodelle des Gesamtsystems untersucht.



Die Professur Energie- und Hochspannungstechnik ist dabei zum einen durch den Nachwuchswissenschaftler Björn Born vertreten. Er beschäftigt sich dabei mit neuartigen Ladesteuerungen für ein möglichst CO<sub>2</sub>-neutrales Laden der Elektrofahrzeuge in Verbindung mit stationären Speichersystemen. Des Weiteren wird die Nachwuchsforschergruppe durch Dr. Jens Teuscher koordiniert.

**7.3.4 Bewilligung BMWi-Verbundvorhaben „OptiStore: Entwicklung eines innovativen Eigenverbrauchssystems auf Basis einer modularen Stromrichter-Lithium-Ionen-Batterie-Einheit zur optimalen Nutzung regenerativer Energiequellen im gewerblichen und industriellen Sektor“**

Das BMWi-Verbundvorhaben „OptiStore“ beschäftigt sich mit der Entwicklung eines innovativen Eigenverbrauchssystems auf Basis einer modularen Stromrichter-Lithium-Ionen-Batterie-Einheit zur optimalen Nutzung regenerativer Energiequellen im gewerblichen und industriellen Sektor. Der Fokus liegt auf der konsequenten Optimierung der Investitions- und Betriebskosten des Gesamtsystems durch technische und methodische Verbesserungen in den Bereichen der Einzelkomponenten (Stromrichtermodul, Lithium-Ionen-Batterieeinheit, Energiemanagement), der Systemtechnik (Topologie, Regelung der Leistungsflüsse, Schnittstellen, etc.), sowie der Betriebsführung. Ziel des Teilvorhabens an der TU Chemnitz ist die Entwicklung eines innovativen, optimierenden und prädiktiven Betriebsführungsverfahrens für die OptiStore-Modul-/Systemlösung zur möglichst gleichzeitigen Maximierung von Eigenverbrauchsquote und Batterielebensdauer, zur Minimierung externer Stromkosten (unter Berücksichtigung von Energie-, Leistungspreisen und zeitvariablen Tarifen) sowie zur Minimierung auftretender Netzurückwirkungen. In diesem Zusammenhang sollen auch geeignete Verfahren zur Analyse und Prognose der auftretenden Energiezeitreihen (Industriellast- und PV-Profile), peak-shaving- und load-levelling-Strategien, Verfahren zum Monitoring und zur Zustandsdiagnose der Lithium-Ionen-Batterie sowie ein regelungs-/optimierungsbasiertes Steuerungskonzept entwickelt und miteinander kombiniert werden. Weiterhin wird eine umfangreiche Vermessungs- und Testinstallation bei einem Industrieunternehmen wissenschaftlich begleitet und die Aufbereitung, Speicherung, Auswertung und Bereitstellung aller Messdaten über einen Datenbank-Server durchgeführt.

Laufzeit: 1.11.2015 – 31.10.2018  
 Partner: Fraunhofer ISE, Akasol GmbH, Refu Elektronik GmbH  
 Gesamtvolumen: 2,3 M€  
 Dr.-Ing. Thilo Bocklisch,  
 Dipl.-Ing. M. Paulitschke, Dipl.-Ing. M. Böttiger

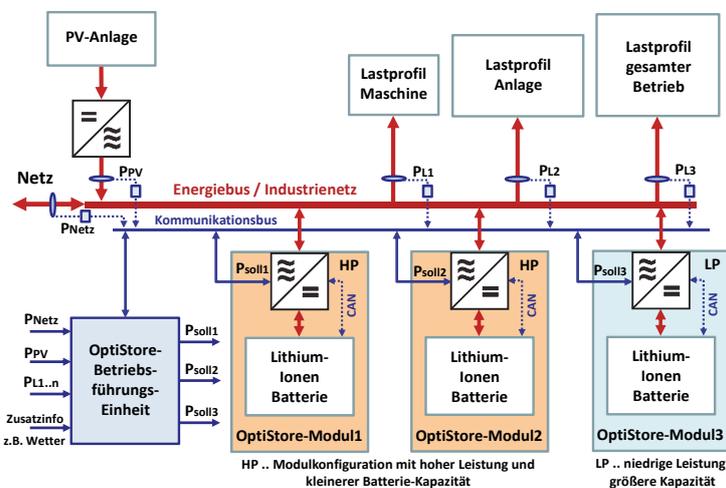


Abb. 1: Prinzipielle Struktur der OptiStore-Modul-/Systemlösung

### 7.3.5 Bewilligung des Forschungsprojektes NETZHARMONIE – Optimierte Effizienz und Netzverträglichkeit bei der Integration von Erzeugungsanlagen aus Oberschwingungssicht

Im Forschungsprojekt NETZHARMONIE sollen aktuelle Bewertungsverfahren verbessert werden, um die derzeit bestehenden Übergangsregelungen zu ersetzen und aus Sicht der Oberschwingungsbewertung bisher ungenutzte Netzkapazitäten zum Anschluss von Windenergie- und Photovoltaikanlagen in allen Netzebenen zu erschließen. Im Rahmen des Vorhabens widmet sich die TU Chemnitz den Problemstellungen, die sich aus folgenden Arbeitspackten (APs) vom Gesamtvorhaben ergeben:

AP2: Hierbei sollen die notwendigen Kenntnisse zur Modellierung der Erzeugungsanlagen (EZA) und Erzeugungseinheiten (EZE) erweitert werden. Es werden Freifeldmessungen durchgeführt. Mit den Ergebnissen der Messdatenauswertung werden unter anderem das Summationsgesetz und die Netzvorbelastung untersucht.

AP3: Unter Nutzung der EZE-Modelle von Herstellern und der Messdatenbasis aus AP2 werden neue Validierungsprozesse für EZE-Modelle erstellt. Im EZA-Bereich werden die möglichen Betriebsmittel im Frequenzbereich nachgebildet. Anschließend werden Phänomene/Effekte untersucht, die bei der EZA-Modellierung zu berücksichtigen sind.

AP5: Es soll die Aufteilung der Oberschwingungsemissionen zwischen verschiedenen Netzebenen untersucht und weiterhin die in Normen verwendeten Netzebenenfaktoren überprüft werden. Hierzu erfolgt die Erstellung vereinfachter EZA-Modelle für Netzsimulationen. Außerdem werden frequenzabhängige Netzimpedanzen anhand von Messdaten aus AP4 modelliert. Nach Durchführung der Simulationen werden Modellierungsempfehlungen für netzweite Oberschwingungsberechnungen erarbeitet.

AP6: Zunächst werden bestehende Bewertungsverfahren auf Basis der Analyse von Messungen und Simulationen untersucht und miteinander verglichen. Gegebenenfalls werden die vorhandenen Bewertungsverfahren modifiziert beziehungsweise neu definiert.

Der Fokus der TU Chemnitz liegt hauptsächlich bei Forschungsaufgaben. Insbesondere werden die für die Modellierung der EZE und EZA relevanten Aspekte untersucht. Aufgrund der Erfahrungen/Vorarbeiten wurde auch die Leitung von AP3 an die TU Chemnitz übertragen. Weiterhin beschäftigt sich die TU Chemnitz teilweise auch mit den praxisbezogenen Themen (Teilnahme am AP2). Das Themenfeld der TU Chemnitz erstreckt sich aus Sicht der Netzebenen im Wesentlichen über die Mittelspannungs- und teilweise Hochspannungsebenen (MS- und HS-Ebenen). Insbesondere handelt es sich um die Ansätze zur Erzeugungsanlagenmodellierung und Entwicklung neuer Bewertungsverfahren bezüglich der Oberschwingungen. Diese Kenntnisse sollen anschließend in Normen berücksichtigt und durch Publikationen der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden.

Laufzeit: 1.01.2015 – 31.12.2017

Partner:

TU Chemnitz; TU Dresden; FGW e.V.;  
GL Garrad Hassan Deutschland GmbH; FGH;  
UL International GmbH (DEWI); M.O.E. GmbH;  
Helmut-Schmidt-Universität; TU Dresden;  
SMA Technologie AG; ENERCON GmbH; Wind-  
guard Certification GmbH;  
Fraunhofer (ISE und IWES); Netze BW GmbH;  
KACO new energy GmbH; Siemens Wind Power  
A/S

Gesamtvolumen: über 5 Mio. €

Ansprechpartner der TU Chemnitz:

M.Sc. Kaveh Malekian

**STROMNETZE**

Forschungsinitiative der Bundesregierung

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

### 7.3.6 Weihnachtsfeier am 14. Dezember 2015

Auch in diesem Jahr trafen wir uns in der Vorweihnachtszeit in geselliger Runde. Unser diesjähriger Jahresabschluss wurde im „Forsthaus Grüna“ gefeiert.



Wir mussten in diesem Jahr leider auf die winterliche, tief verschneite Landschaft, wie vor drei Jahren, verzichten. In diesem Jahr saßen wir im Raum „Seeber“, der schön festlich geschmückt war.

Die Speisekarte und die Qualität der Speisen ließen wieder keine Wünsche offen.

Die zu viel „angefutterten“ Kalorien konnten wir im Anschluss an das Essen auf den beiden Bowling-Bahnen wieder abtrainieren!



## 8 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 200kV



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



## 9 Laborausstattung

### 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 A für Kabelmantelprüfung

### Blitzspannungsprüfeinrichtung SIP 010, transportabel

Wechselspannung bis 5 kV  
Stoßspannung 1,2/50  $\mu\text{s}$  bis 10 kV

Spannungsmessteiler

Ohmsche Teiler bis 200 kV  
Kapazitive Teiler bis 300 kV  
Stoßspannungsteiler bis 600 kV (1,2/50  $\mu$ s)

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

8-Kanal Scope Corder DL 708 (YOKOGAWA)  
Abtastrate bis 10 Megasample pro s  
Auflösung: 10 bit

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  $\mu$ Sv/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

40V/ 100A

## Software

### MATLAB

Programmpaket zur Analyse von Daten, Durchführung von Simulationen und Programmierung

### ATP/EMTP

Simulation dynamischer und transientscher Netzvorgänge der Energieversorgung

### EMTDC/PSCAD

Simulation dynamischer und transientscher 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 9

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>

## 10 Dienstleistungen

### 10.1 Dielektrische Prüfungen

Wechselspannungsprüfungen bis 200 kV

Stoßspannungsprüfungen bis 600 kV

Gleichspannungsprüfungen bis 140 kV

FGH-Stufentest an Mittelspannungskabeln

Vor-Ort-Spannungsprüfungen an Mittelspannungskabeln und anderen kapazitiven Prüfobjekten mit einem mobilen Resonanzprüfsystem

### 10.2 Diagnosemöglichkeiten

Verlustfaktormessung im Labor

Verlustfaktormessung Vor-Ort mit einem mobilen Resonanzprüfsystem

Teilentladungsmessungen im Labor

Verlustfaktormessung Vor-Ort mit einem mobilen Resonanzprüfsystem

Isotherme Relaxationsstrom-Analyse (IRC) an Energiekabeln

Messungen von Isolations- und Ableitwiderständen

### 10.3 Prüfung der Stromtragfähigkeit

Widerstandsmessungen von Hauptstrombahnen

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

- Leiteranordnungen
- Geräte
- Schaltfelder

#### 10.4 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)

#### 10.5 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>

#### 10.6 Netzanalysen

Lastfluss-, Lastgang- und Leitungsfehlerberechnung in Energieübertragungs- und Verteilnetzen

Netzverlustanalysen

Versorgungszuverlässigkeit

Netzoptimierung

Oberschwingungsanalysen an Netzanschlusspunkten des Übertragungsnetzes

Berechnungen von transienten Vorgängen

## 11 Referenzen

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

- Netzgesellschaft mbH Chemnitz
- Stadtwerke Leipzig GmbH
- ENSO Netz, Dresden
- enviaM

Netzanalyse, Versorgungszuverlässigkeit

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

Betriebsmitteldatenbank

- TOTAL Raffinerie Mitteldeutschland GmbH

Netzverluste

- eins energie in sachsen GmbH & Co. KG

Prognosen zum Elektroenergiebedarf und Spitzenleistungen einzelner Umspannwerke

- eins energie in sachsen GmbH & Co. KG

Erstellung von Lastprofilen Strom/ Gas

- eins energie in sachsen GmbH & Co. KG

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

- SAG Montagegesellschaft mbH

Kurzschlussstromprüfung Schutzwiderstand

- Türk und Hillinger

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

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

- Landkreis Vogtland

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

- Netzgesellschaft mbH Chemnitz

Entwicklung von Speicherkonzepten im Bereich von 1 bis 10 MW

- eins energie in sachsen GmbH & Co. KG

Analyse von Nutzungskonzepten für energienahe Dienstleistungen

- eins energie in sachsen GmbH & Co. KG

Definition der anteiligen Planungspegel für Oberschwingungen in Offshore-Netzen

- TenneT Offshore GmbH

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

- TenneT Offshore GmbH

**SIEMENS**

**eins**  
energie in sachsen

**DNV·GL**

**inetz**

**ALSTOM**

**ENERCON**  
ENERGIE FÜR DIE WELT

**STADTWERKE  
ROSTOCK AG**

**ENSO**

**OWS**  
Off-Shore Wind Solutions

**envia<sup>M</sup>**

**Tennet**  
Taking power further

**MITNETZ**  
STROM

**HIGH  
VOLT**

**NH HH**

**SÜD**  
ELEKTRODRAHT  
150 Jahre

**Heliocentris**

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.						
Basismodul (Pflicht)	5.				Hochspannungstechnik 3 1 2		
	6.		Elektroenergieübertragung und -verteilung 3 1 2		Netze und Betriebsmittel 2 1 0		
Vertiefungsmodul (Pflicht, Wahlpflicht, Wahl)	<b>Bachelorarbeit</b>						
<b>Master-Studiengang Energie- und Automatisierungssysteme</b>							
Ergänzungsmodul (Pflicht, Wahlpflicht, Wahl)	7.		Elektroenergiewirtschaft 1 0 0	Beanspruchung von Betriebsmitteln 3 1 1			
	8.			Netzberechnung und Schutztechnik 1 1 0	Statistik und Isolationskoordination 2 1 0		
9.	Praktikum						
10.	<b>Masterarbeit</b>						
<b>Forschungsschwerpunkte</b>							
Analyse von Netzen und Betriebsmitteln	Zustandsbewertung und Asset-Management						
	Oberschwingungsverhalten regenerativer Erzeugungsanlagen / Ausgleichsvorgänge im Elektroenergiesystem						
Dezentrale Energiesysteme	Netzanbindung leistungsstarker Windparks						
	Netzintegration der Elektromobilität						
Netzausbaustrategien	Modellierung zukünftiger Niederspannungsnetze						
	Speichersysteme für eine nachhaltige Energieversorgung						
Probabilistische Netzplanung							
<b>Anspruch:</b>	<b>Kompetenzzentrum für aktuelle Fragestellungen der Elektroenergieversorgung</b>						

Anfahrtsskizze:



Sie finden uns hier!

## Notizen

## Notizen