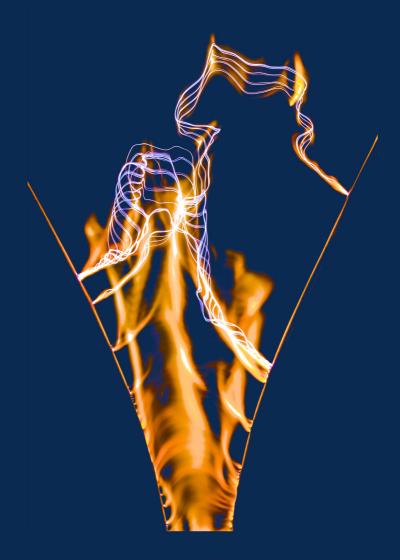


Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

# Jahresbericht 2014

Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik



### Vorwort

Sehr geehrte Freunde des Instituts für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik,

diesen Jahresbericht nehme ich zum Anlass, allen Mitarbeitern des Instituts, Freunden und Partnern für ihre tatkräftige Mitarbeit und Unterstützung im vergangenen Jahr zu danken. Außerdem wollen wir Sie mit dem vorliegenden Jahresbericht 2014 über wichtige Ereignisse und Aktivitäten des Instituts für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik informieren. Dabei können wir wieder auf erfolgreiche Arbeiten in der Lehre und in der Forschung zurückblicken.

Die gute Zusammenarbeit mit unseren Partnern in der Industrie und der Energiewirtschaft ermöglichten es uns, auch im vergangenen Jahr wieder umfangreiche neue Forschungsprojekte zu akquirieren. Dazu zählen auch zahlreiche neue öffentlich geförderte Projekte im Rahmen verschiedener Ausschreibungen von Bund und Land. Ein Beispiel ist die Förderinitiative "Zukunftsfähige Stromnetze", die gemeinsam von dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gestartet wurde. Im Rahmen dieser Förderinitiative konnten mehrere neue Forschungsprojekte eingeworben werden. Damit hat sich das Forschungsvolumen am IEEH weiter vergrößert. Dies spiegelt sich auch in der immer noch wachsenden Zahl von Doktoranden wider.

Übersteigt der Anteil der erneuerbaren Energien 40 % an der gesamten Bereitstellung elektrischer Energie, so wurde die Notwendigkeit von Energiespeichern in Studien z. B. des Verbandes der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (VDE) bereits im Jahr 2012 hervorgehoben. Zurzeit ist eine Integration von Speichern noch nicht zwingend notwendig. Trotzdem muss die Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet verstärkt werden, damit im Jahr 2025 einsatzfähige Speichertechnologien zur Verfügung stehen. Die Professoren der Energietechnik haben daher das Forschungscluster Combined Storage Systems Integration (CSSI) gegründet. In diesem Forschungscluster werden die Aktivitäten auf dem Gebiet der Energiespeicher an der TUD koordiniert und abgestimmt. Die Professoren des Forschungsclusters waren in diesem Jahr maßgeblich an der Durchführung sowohl eines Innovationstages zum Thema Energiespeicher als auch der internationalen Sommerschule ENERstore 2014 beteiligt. Beide Veranstaltungen haben zur nationalen und internationalen Reputation auf diesem Gebiet beigetragen. Es ist geplant, diese auch in den kommenden Jahren weiter zu führen.

Die Lehre wird durch die Zahl der Studienanfänger an der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik in den Studiengängen "Elektrotechnik", "Informationssystemtechnik", "Mechatronik" und "Regenerative Energiesyste-

me" maßgeblich geprägt. Die Anzahl der Studienanfänger in den genannten Studiengängen hat sich nach der Spitze der vorangegangenen Jahre wieder stabilisiert. Die Anzahl der Studierenden der Studiengänge "Elektrotechnik" und "Regenerative Energiesysteme", die sich für die Studienrichtung Elektroenergietechnik entschieden haben, war jedoch wieder erfreulich hoch. Gleichzeitig gibt es einen Zuwachs von Studierenden aus der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät auf dem Gebiet der elektrischen Energietechnik.

Die schon im letzten Jahr begonnenen Baumaßnahmen im Töplerbau haben inzwischen erhebliche Auswirkungen auf das gesamte Institut. So mussten nicht nur zahlreiche wissenschaftliche Mitarbeiter, sondern auch die elektrotechnische Werkstatt vollständig aus ihren Räumen im Töplerbau ausziehen. Diese sind nun in unterschiedlichen Räumen im Töpler- und Binderbau provisorisch untergebracht. Darüber hinaus mussten teilweise Materialien und Werkzeuge in andere Gebäude der Technischen Universität ausgelagert werden. Hieraus ergeben sich erhebliche Störungen und zusätzliche Belastungen. Allen Mitarbeitern des Instituts sei an dieser Stelle für ihr Engagement zur Aufrechterhaltung des fast normalen Betriebs am Institut gedankt. Wir freuen uns alle gemeinsam auf die Phase nach dem Umbau und hoffen, dass die Baumaßnahmen einigermaßen termingerecht im nächsten Jahr abgeschlossen werden.

Für die Unterstützung bei der praxisbezogenen Ausbildung der Studierenden möchten wir uns besonders bei den Dozenten aus der Industrie bedanken. Herr Professor Gert Hentschel, Herr Dr.-Ing. Konstantin O. Papailiou, Herr Dr. Matthias Hable und Herr Schindler haben durch ihr Lehrangebot wesentlich dazu beigetragen die Attraktivität der elektrischen Energietechnik bei den Studierenden zu steigern.

Unser herzlicher Dank gilt auch den ehemaligen Mitarbeitern unseres Instituts, Doz. Dr. Hartmut Bauer, Dr. Eberhard Engelmann, PD Dr. Helmut Löbl und Prof. Gert Winkler. Sie haben uns auch im letzten Jahr, trotz ihres wohlverdienten Ruhestandes, wieder mit Rat und Tat unterstützt.

Mit großer Freude konnten wir mit unserem Hochspannungslabor in diesem Jahr wieder einmal die Bühne für ein hochrangiges kulturelles Ereignis der Landeshauptstadt Dresden bieten. Im Rahmen der Dresdner Musikfestspiele gab es mit der Initiative "Musik trifft Wissenschaft" von Intendant Jan Vogler und Magnifizenz Prof. Hans Müller-Steinhagen musikalische Hochspannung mit der Aufführung "The Knights NYC meet Bohème 2020".

Wir wünschen Ihnen ein gesundes, erfolgreiches und frohes Jahr 2015 und freuen uns auf eine weiterhin gute Zusammenarbeit.

Dresden, Dezember 2014

Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner

Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann

# Inhaltsverzeichnis

1	Pers 1.1 1.2 1.3	Lehrstuhl Elektroenergieversorgung	<b>4</b> 3 7
2	<b>Lehr</b> 2.1	Lehrveranstaltungen	2
3	Fors	Ichung18Lehrstuhl Elektroenergieversorgung183.1.1 Forschungsschwerpunkte und Forschungsprojekte183.1.2 Publikationen62	3
	3.2 3.3 3.4	Lehrstuhl Hochspannungs- und Hochstromtechnik703.2.1 Forschungsschwerpunkte und Forschungsprojekte703.2.2 Publikationen10Preise und Auszeichnungen11Promotionen11	) 6 1
4	Koo 4.1 4.2 4.3	perationen116Wissenschaftskooperationen11Industriekooperationen11Kommissions- und Gremienarbeit124.3.1 Lehrstuhl Elektroenergieversorgung124.3.2 Lehrstuhl Hochspannungs- und Hochstromtechnik12	680
5	Vera	nstaltungen 122	2
Tit	elbild	: Hörnerableiter – Ausdehnung und Wanderung des Lichtbogens durch thermischen Auftrieb	
Fo	to:	Jürgen Grobshäuser	

# 1 Personelle Besetzung

# 1.1 Lehrstuhl Elektroenergieversorgung

Titel	Nachname	Vorname	leleton (0351-463-)				
Leiter der Professur							
Prof. DrIng.	Schegner	Peter	34374/ Fax 37036				
	Hochsch	nullehrer					
HonProf. DrIng.	Hentschel	Gert					
Dozent DrIng.	Bauer	Hartmut	35104				
Prof. DrIng. habil.	Winkler	Gert	35088				
	Dozenten und L	_ehrbeauftragte					
DrIng.	Hable	Matthias					
DrIng.	Meyer	Jan	35102				
DrIng.	Meyer	Jörg	35272				
DiplIng.	Schindler	Jörg					
	Sekre	etariat					
	Scharf	Regina	33202				
	Projektma	nagement					
DiplIng.	Keller	Jan	35432				
Wissenschaftliche Mitarbeiter							
M.Eng.	Blanco Castañeda	Ana Maria	32482				
M.Sc.	Cabadag	Rengin Idil	43205				
DiplIng.	Dickert	Jörg	43201				
DiplIng.	Domagk	Max	35223				

Telefon

Titel Nachname Vorname		Vorname	Telefon (0351-463-)			
Wissenschaftliche Mitarbeiter						
DiplIng.	Erdmann	Niels	43203			
DiplIng.	Heß	Tobias	32941			
DiplIng.	Gasch	Etienne	43206			
M.Sc.	Jäschke	Christian	35353			
B.Eng.	Jimenez Manjarres	Yulieth	(seit 09/2014)			
DiplIng.	Klatt	Matthias	43207			
DiplIng.	Kreutziger	Marcus	43202			
DiplIng.	Möller	Friedemann	43209			
DiplIng.	Müller	Sascha	43210			
DiplIng.	Palm	Sebastian	33094			
M.Eng.	Romero Lozano	Miguel Fernando	(04/2014- 10/2014)			
DrIng.	Schmidt	Uwe	43204			
DiplIng.	Schnelle	Tobias	33725			
DiplIng.	Schöttke	Stefan	43208			
DiplIng.	Stiegler	Robert	32217			
M.Sc.	Wenzlaff	Karsten	43200			
DiplIng.	Werner	Jens	33086			
M.Sc.	Yanchenko	Sergey	(seit 10/2014)			
Prof.	Živanović	Rastko	(03/2014 bis 04/2014)			
M.Eng.	Zyabkina	Olga	(seit 12/2014)			

# 1.2 Lehrstuhl Hochspannungs- und Hochstromtechnik

Titel	Nachname	Vorname	Telefon (0351-463-)				
Leiter der Professur							
Prof. DrIng.	Großmann	Steffen	33428/ Fax 37157				
Profess	oren und Hochso	chullehrer im Ruhes	stand				
Prof. DrIng. habil.	Eberhardt	Martin					
DrIng.	Engelmann	Eberhard					
PD DrIng. habil.	Löbl	Helmut	32138				
	Dozenten und L	Lehrbeauftragte					
DrIng.	Fiebig	Reiner					
DrIng.	Fricke	Winfried					
DiplIng.	Kudoke	Matthias					
DrIng.	Kunze	Dirk					
Dr. techn. habil.	Papailiou	Konstantin					
DrIng. habil.	Schmuck	Frank					
	Sekre	etariat					
	Hendrich	Ulrike	33428				
	Projektma	nagement					
DiplKfm.	Langos	Sebastian	32963				
	Wissenschaftlic	che Mitarbeiter					
DiplIng.	Adam	Robert	34789				
DiplIng.	Backhaus	Karsten	33608				
M.Eng.	Bakka	Maher	34948				
DrIng.	Baumann	Matthias	33080				
DiplIng.	Bäuml	Katrin	(extern)				
DiplWiIng.	Dreier	Sebastian	34756				

Titel	itel Nachname Vorname		Telefon (0351-463-)		
Wissenschaftliche Mitarbeiter					
M.Sc.	Esmaeil Moghadam	Davoud	33608		
DiplIng.	Fuhrmann	Torsten	39982		
DiplIng.	Gatzsche	Michael	34756		
DiplIng.	Gründel	Melanie	34789		
DiplIng.	Hering	Maria	33608		
DiplIng.	Hildmann	Christian	33917		
DiplIng.	Kaufmann	Benjamin	(bis 07/2014)		
DiplIng.	Kühnel	Christian	33917		
DrIng.	Lücke	Nils	34756		
DiplIng.	Pampel	Hans-Peter	33103		
DiplIng.	Pfeifer	Stephanie	39982		
DiplIng.	Ramonat	Alexander	33917		
DrIng.	Speck	Joachim	33105		
DrIng.	Schlegel	Stephan	32746		
DiplIng.	Voigt	Matthias	33080		
M.Eng.	Wei	Moyan	(bis 11/2014)		

	Technisc	he Angestellte	
DiplIng. (FH)	Göres	Axel	32613

# 1.3 Labor und Werkstatt

Nachname	Vorname	Telefon (0351-463-)
Dittrich	Ralf	34745
Eusewig	Falk	33516
Gläser	Michael	34260
Jarosczinsky	Gerd	34745
Knüpfel	Helge	34260
Reichelt	Eric	34745
Wermuth	Peter	33516

# 2 Lehre

# 2.1 Lehrveranstaltungen

# 2.1.1 Lehrveranstaltungen für das Grundstudium

Vorlesungen / Übungen / Praktika	SS	WS
Modul Elektroenergietechnik		
Elektroenergietechnik		0/1/0
Prof. Schegner		3/1/0
Praktikum Elektroenergietechnik	0/0/1	

# 2.1.2 Lehrveranstaltungen für das Hauptstudium

Vorlesungen / Übungen / Praktika	SS	WS
Modul Hochspannungs- und Hochstroi	mtechnik	
Hochspannungs- und Hochstromtechnik		2/1/0
Prof. Großmann		2/1/0
Praktikum Hochspannungs- und Hochstromtechnik		0/0/1
Modul Grundlagen elektrischer Energieverso	rgungssyste	me
Betriebsmittel und Berechnungsgrundlagen für		
elektrische Energieversorgungssysteme		2/1/0
Prof. Schegner		
Grundlagen der Elektroenergieanlagen		1/1/0
Modul Betrieb elektrischer Energieversorg	uinasvsteme	<b>.</b>
Betrieb von elektrischen	ungoyotome	<u>'</u>
Energieversorgungssystemen und -anlagen	2/1/0	
Prof. Schegner		
Praktikum Elektroenergiesysteme	0/0/1	
Praktikum Hochspannungstechnik 2	0/0/1	

Vorlesungen / Übungen / Praktika	SS	WS
Modul Hauptseminar		
Hauptseminar Elektrische Energietechnik	0.10.10	
Prof. Schegner/ Prof. Großmann	0/2/0	
Modul Oberseminar		
Oberseminar Elektrische Energieversorgung		0/2/0
Prof. Schegner/ Prof. Großmann		0/2/0
Modul Systemverhalten und Versorg elektrischer Energieversorgungs	0 ,	
Betriebsvorgänge in Energieversorgungssystemer Prof. Schegner	2/1/0	
Versorgungsqualität Prof. Schegner/ Dr. Jan Meyer	1/1/0	
Komplexpraktikum zum Netzbetrieb	0/0/1	
Modul Planung elektrischer Energieversc	orgungssyster	ne
Netzplanung	1/1/0	
Prof. Schegner/ Dr. Hable	1/1/0	
Elektroenergieanlagenprojektierung	1/1/0	
Prof. Schegner/ Prof. Hentschel	1/1/0	
Netzberechnung Prof. Schegner	2/2/0	
Modul Schutz- und Leittechnik in elektrischen Ene	rgieversorgun	gssystemen
Selektivschutztechnik		2/1/0
Prof. Schegner/ Dr. Jörg Meyer		2/1/0
Leittechnik		1/1/0
Prof. Schegner/ DiplIng. Schindler		1/1/0
Praktikum Sekundärtechnik		0/0/1
Modul Vertiefung Hochspannung	gstechnik	
Hochspannungstechnik		
Isoliertechnik	5/0/0	
Blitzschutztechnik	3,0,0	
Prof. Großmann/ Dr. Speck		
Praktikum Vertiefung Hochspannungstechnik	0/0/1	

Vorlesungen / Übungen / Praktika	SS	WS
Modul Beanspruchung elektrischer Betrie	bsmittel	
Erwärmungsverhalten		
Elektrische Kontakte und Verbindungen		
Mechanische Beanspruchung		3/0/0
Prof. Großmann/ Dr. Schlegel/ Dr. Lücke/		
DiplIng. Adam		
Geräte der Energietechnik		0/1/0
Prof. Großmann		
Praktikum Beanspruchung elektrischer		0/0/2
Betriebsmittel		
Modul Experimentelle Hochspannungst	ochnik	
Hochspannungsprüftechnik	GOIIIIK	
Hochspannungsmesstechnik		
Planung und statistische Auswertung		4/0/0
von Experimenten		., 0, 0
Prof. Großmann/ Dr. Speck		
Praktikum Experimentelle Hochspannungstechnik		0/0/2
Weitere Vertiefungsfächer		
Aktuelle Probleme der Elektrischen		
Energieversorgung und Hochspannungstechnik		0/2/0
Prof. Schegner/ Prof. Großmann		
Ausgewählte Kapitel der Elektrischen Energ	gietechnik	
Freileitungsbau		0.11.10
Hochspannungsgeräteentwicklung		2/1/0
Prof. Großmann/ Dr. Papailiou/ Gastdozenten		
Zuverlässigkeits- und Sicherheitsberechnung	2/1/0	
Doz. Dr. Bauer		

# 2.1.3 Lehrexport an andere Fakultäten – Grundstudium

Vorlesungen / Übungen / Praktika	SS	WS
Elektroenergieversorgung für		
Wirtschaftsingenieure und Lehramt an berufsbildenden Schulen		2/1/0
Doz. Dr. Bauer		
Hochspannungstechnik für Wirtschafts- und		
Verkehrsingenieure (Diplom)		2/1/1
Prof. Großmann / Dr. Speck		
Hochspannungs- und Hochstromtechnik für		
Wirtschaftsingenieure (Bachelor)		2/1/1
Prof. Großmann		
Elektrotechnik für die Fakultät Maschinenwesen		2/2/0
Prof. Großmann		<i></i>

#### 2.2 Studentische Arbeiten

## 2.2.1 Studienarbeiten und Forschungspraktika

Schubert, Uwe

Untersuchung der Messgenauigkeit von Rogowski-Spulen im Frequenzbereich von 2 kHz bis 150 kHz

09/2012 (Betreuer: Dipl.-Ing. Stiegler)

Li, Yongning

Experimentelle Untersuchung des laminaren-turbulenten Übergangs natürlicher Konvektionsströmungen

15/2012 (Betreuer: Dipl.-Ing. Kaufmann)

Heger, Julian

Untersuchung der Erwärmung von in Stahltrogschwellen gelagerten Weichenantrieben

04/2013 (Betreuer: Dipl.-Ing. Kaufmann)

Nguyen, Thanh Kim

Implementieren von Algorithmen zur automatischen Erstellung von Netzwerkmodellen

06/2013 (Betreuer: Dipl.-Ing. Kaufmann)

Beyer, Michael

Berechnung der Ladungsträgerdrift in Isolieröl mittels der Piossen-Nernst-Planck-Gleichung

07/2013 (Betreuer: Dipl.-Ing. Backhaus)

Weber, Sten

Konzeption eines Versuchsstandes "Generatorschutz"

13/2013 (Betreuer: Dr.-Ing. Jörg Meyer)

Hauptmann, Henning

Entwicklung und Inbetriebnahme einer Anordnung zur Bestimmung der frequenzabhängigen Impedanz im Niederspannungsnetz

14/2013 (Betreuer: Dipl.-Ing. Stiegler)

Liebermann, Carlo

Modellierung und messtechnische Untersuchung von inneren Transformatorfehlern

15/2013 (Betreuer: Dr.-Ing. Jörg Meyer)

Wei, Yu

Beschreibung einfacher 110-kV-Netze mit Vierpolparametern zur Berechnung einer Impedanz-Frequenz-Charakteristik

17/2013 (Betreuer: Dr.-Ing. Schmidt)

Lei, Ting

Langsam ansteigende Überspannungen (Schaltüberspannungen) in Schaltanlagen der Elektroenergieversorgung

18/2013 (Betreuer: Dr.-Ing. Schmidt)

Yan, Chunyang

Automatisierte Erstellung und Verarbeitung von COMTRADE-Dateien aus Simulationen

19/2013 (Betreuer: Dipl.-Ing. Palm)

Fricke, Oliver

Einfluss des Zubaus neuer Erzeugungsanlagen auf den Erdschluss-Reststrom im 110-kV-Netz

20/2013 (Betreuer: Dr.-Ing. Schmidt)

Tiebel, Ralph

Improvement of Reactive Power Management in Sub-transmission Systems by Wind-Farm Clustering and Particle Swarm Optimization (PSO)

21/2013 (Betreuer: Dr.-Ing. Schmidt)

Schnelle, Tim

Lastflussuntersuchungen an einem differenzierten Knotenpunktmodell für 110-kV-/MS-Umspannwerke im ländlich geprägten Verteilnetz der Mitteldeutschen Netzgesellschaft Strom

26/2013 (Betreuer: Dr.-Ing. Schmidt)

Frowein, Karla

Einfluss des Zubaus von Kabelanlagen auf den Erdschluss-Reststrom im 110-kV-Netz

01/2014 (Betreuer: Dr.-Ing. Schmidt)

Pietsch, Hannes

Untersuchungen zum Durchschlagverhalten gasisolierter Systeme mit erwärmten Elektroden

02/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Hering)

Strube, Corinna

Integration eines Siemens-Distanzschutzgeräts in den Versuchsstand

Combined Energy Lab

05/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Werner)

Kropp, Alexander

Aufbau und Konzeption von Langzeitversuchen elektrischer Kontakte anhand einer Modellanordnung gekreuzter Zylinder

08/2014 (Betreuer: Dipl.-Wi.-Ing. Dreier)

Linde, Jan Thomas

Bestimmung der Leitfähigkeitsmechanismen mineralischen Isolieröls bei hoher Gleichspannung

12/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Backhaus)

Lutze, Martin

Konstruktion, Aufbau und Inbetriebnahme einer Versuchsanordnung zum Untersuchen der Kontakteigenschaften versilberter Blechproben

14/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Gatzsche)

Armbruster, Markus

Untersuchungen zum Verbindungswiderstand von Pressverbindungen für Freileitungsseile

15/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Hildmann)

Weinzierl, Barbara

Koordinierter Betrieb von  $\mu$ KWK- und PV-Anlagen zur Erhöhung der Durchdringung von Niederspannungsnetzen mit dezentralen Erzeugern und Bestimmung des optimalen thermischen Speichervolumens

17/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Heß)

Götz. Thomas

Schnelle Störlichtbogendetektion - Konzeption eines Versuchsstandes

18/2014 (Betreuer: M.Sc. Wenzlaff)

Kast, Andreas

Entwicklung eines autarken Energiesystems zur Elektrifizierung eines Schulkomplexes in Gambia

21/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Dickert)

Gaunitz, Stephan

Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Presverbindungen mit feinund feinstdrähtigen Aluminiumleitern

23/2014 (Betreuer: Dr.-Ing. Lücke/ Dr.-Ing. Schlegel)

Buhr, Jonas

Optimierte Betriebsführung von  $\mu$ KWK-Anlagen zur Reduktion der Netzhöchstlast

27/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Werner)

### 2.2.2 Diplom- und Masterarbeiten

Mittrach, Tobias

Komplexkalibrierung eines unkonventionellen Verlustmesssystems

07/2013 (Betreuer: Dr.-Ing. Speck)

Karberg, Stephan

Modellierung der Oberschwingungsaussendung von Elektrofahrzeugen

08/2013 (Betreuer: Dipl.-Ing. Möller)

Kinzel, Steven

Untersuchungen zur Entladungsbeständigkeit von isolierenden Seilen für

das Arbeiten unter Spannung

09/2013 (Betreuer: Dipl.-Ing. Pampel)

Winkler, Martin

Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen der mechanisch verformten, der scheinbaren und der wahren Kontaktfläche

10/2013 (Betreuer: Dipl.-Wi.-Ing. Dreier)

Tschätsch, Sven

Einfluss des Fehlerortes auf die frequenzabhängige 110-kV-Netzimpedanz

bei Resonanz-Sternpunkterdung 11/2013 (Betreuer: Dr.-Ing. Schmidt)

Ma, Liya

Potenziale von 110-kV-Verteilnetzen zur Deckung des Blindleistungshaus-

haltes des Übertragungsnetzes

01/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Kreutziger)

Golletz, Christian

Untersuchung des technischen Potentials von dezentralen Erzeugungsan-

lagen zur Beteiligung an der Primärregelung

02/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Heß)

Krahmer, Sebastian

Optimierte Blindleistungsbereitstellung durch dezentrale Erzeugungsanla-

gen im Niederspannungsnetz

03/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Dickert)

Lies, Florian

Untersuchungen zur thermischen Beanspruchung von versilberten federn-

den Kontaktelementen im Dauerbetrieb

04/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Gatzsche)

#### Kobel, Frank

Untersuchungen zum Überschlagverhalten von Isolatoren in gasisolierten Systemen bei Gleichspannungsbelastung

06/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Hering)

#### Apel, Thomas

Untersuchungen zum Verhalten von Isolatoren in gasisolierten Systemen unter Anwesenheit einer festen Störstelle bei Gleichspannungsbelastung 08/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Hering)

#### Li, Yongning

Untersuchungen zur elektrischen Leitfähigkeit ultrahochfesten Betons 09/2014 (Betreuer: M.Eng. Bakka)

#### Schmidt, Maximilian

Untersuchungen zur Frequenz- und Spannungsregelung modularer Netze mit hohem Anteil erneuerbarer Energieanlagen

11/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Schnelle)

#### Weber, Sten

Maßnahmen zur Vermeidung zeitweiliger Überspannungen als Folge dezentraler Einspeisung im 110-kV-Netz 12/2014 (Betreuer: Dr.-Ing. Schmidt)

#### Wei, Yu

Bestimmung des Erdschluss-Reststromes eines 20-kV-Netzes bei Berücksichtigung der Netztopologie und der Oberschwingungspegel

13/2014 (Betreuer: Dr.-Ing. Schmidt)

# 3 Forschung

### 3.1 Lehrstuhl Elektroenergieversorgung

### 3.1.1 Forschungsschwerpunkte und Forschungsprojekte

Die elektrische Energieversorgung verändert sich zurzeit grundlegend. Neben der Integration von dezentralen und dargebotsabhängigen Energieerzeugungsanlagen (Wind- und Photovoltaik-Anlagen) sollen künftig auch Elektrofahrzeuge an das Niederspannungsnetz angeschlossen werden. Darüber hinaus erfolgt die Integration von kleinen und kleinsten Blockheizkraftwerken, sogenannte Mikro-KWK-Anlagen, in dieses Netz. Zukünftig wird ein sehr großer Teil der elektrischen Energie in der heutigen Verteilnetzebene produziert. Hierdurch entstehen vollkommen neue Anforderungen an die Betriebsführung, den Selektivschutz und an die Versorgungsqualität in diesen Netzen. Auch im Zusammenhang mit der Systemführung (Stabilität, Spannungshaltung usw.) sind grundlegende Untersuchungen notwendig. Um diesen geänderten Rahmenbedingungen gerecht zu werden, wurden die folgenden Forschungsschwerpunkte an der Professur für Elektroenergieversorgung etabliert. Zu jedem der Forschungsschwerpunkte wird eine Auswahl von im letzten Jahr bearbeiteten Themen genannt.

#### Induktive Wandler

 Analytische Berechnungs- und messtechnische Bewertungsverfahren von Generatorstromwandlern mit erweitertem Frequenzmessbereich

## Planung und Betrieb von Netzen

- Stochastische bottom-up Modellierung von Niederspannungsnetzlasten
- Netzausbauplanung unter veränderten und unscharfen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen
- Nachhaltige Energiesysteme Interdependenz von technischer Gestaltung und gesellschaftlicher Akzeptanz
- Energiewende Sachsen im transnationalen Kontext Strategien und Lösungsansätze für ein nachhaltigeres Energieversorgungssystem
- Ermittlung des Ausbaubedarfs in Verteilnetzen

#### **Power Quality**

- Messgeräte-unabhängiges Datenbanksystem zur zentralen Speicherung von Messdaten der Elektroenergiegualität
- Effiziente Verfahren zur automatisierten, ortsübergreifenden Bewertung der Spannungsqualität bei großen Datenmengen
- Internetbasierte Austauschplattform für gemessene Oberschwingungsspektren von Haushaltsgeräten; PANDA (equiPment hArmoNic DAtabase)
- Identifikation und Qualifizierung korrelativer Zusammenhänge zwischen elektrischer bzw. klimatischer Umgebung und ausgewählten Elektroenergiequalitätskenngrößen
- Einfluss von Elektrofahrzeugen und Photovoltaik-Wechselrichtern auf die Strom- und Spannungsqualität im Niederspannungsnetz (ElmoNetQ)
- Entstehung und Ausbreitung h\u00f6herfrequenter Emission im Frequenzbereich 2 kHz bis 150 kHz im Niederspannungsnetz

#### Schutz- und Leittechnik

- Auswirkungen der verstärkten Einbindung von großen Windparks in das Übertragungsnetz auf das Netzschutzsystem
- Anforderungen an die Erkennung von Netzpendelungen zur Stabilisierung bzw. Freigabe von Distanzschutzeinrichtungen
- Grundlagen des übergeordneten Schutzes von elektrischen Transportund Verteilungssystemen (Systemschutz)

#### Smart Grid

- Smart Energy Management Intelligentes Energiemanagement von Strom - Gas - Wärme - Kälte
- Regionales, virtuelles Kraftwerk auf Basis der Mini- und Mikro-KWK-Technologie - Intelligente Vernetzung von thermischen und elektrischen Verbrauchersystemen
- Combined Energy Lab thermische und elektrische Versuchseinrichtung zum Test von Mikro-KWK-Anlagen

### Projekt zum Forschungsschwerpunkt "Induktive Wandler"



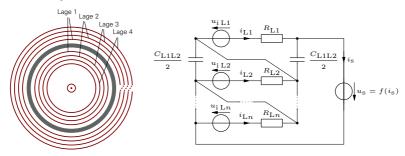
Christian Jäschke, M.Sc.

Modellierung des frequenzabhängigen Übertragungsverhaltens von Hochstromwandlern

Durch den zunehmenden Einsatz leistungselektronischer Komponenten in Geräten und Anlagen in Energieversorgungsnetzen nehmen die Oberschwingungsanteile im Strom zu. Um diese messtechnisch zu erfassen, werden häufig die gleichen induktiven Stromwandler verwendet, die auch zur Messung des 50-Hz-Stromeffektivwertes eingesetzt werden. Dies kann zu einer Verfälschung der Messwerte führen.

Die Sekundärwindungen von Hochstromwandlern, die für die Messung sehr hoher Ströme verwendet werden, sind häufig auf mehrere Wicklungslagen innerhalb des Wandlers verteilt (Bild Ia). Aufgrund von kapazitiven und induktiven Verkopplungen zwischen den einzelnen Lagen, können bei diesen Wandlern Resonanzerscheinungen auftreten, die die Messergebnisse der höherfrequenten Anteile im Strom verfälschen.

Da das frequenzabhängige Übertragungsverhalten von Hochstromwandlern messtechnisch nur mit hohem Auswand erfassbar ist, wurde ein Modell in Form eines elektrotechnischen Ersatzschaltbildes (Bild Ib) erstellt. Mit diesem lässt sich das frequenzabhängige Übertragungsverhalten von Hochstromwandlern nachbilden und die Eigenfrequenzen des Wandlers näherungsweise berechnen. Dadurch lässt sich abschätzen, ab welcher Frequenz mit Resonanzerscheinungen innerhalb eines Hochstromwandlers zu rechnen ist.



(a) Schematische Schnittansicht eines Wandlers mit n=4 Lagen

(b) Elektrotechnisches Ersatzschaltbild

Bild I: Modell eines mehrlagigen Hochstromwandlers

Die gesteuerten Spannungsquellen  $u_{i L1}, u_{i L2}, \ldots, u_{i Ln}$  im Ersatzschaltbild modellieren dabei die induktiven Kopplungen innerhalb des Wandlers. Die

Eigenschaften des Bürdenkreises werden allgemein durch eine gesteuerte Spannungsquelle  $u_{\rm s}$  berücksichtigt. Die einzelnen Kopplungsinduktivitäten und Kapazitäten lassen sich mit Hilfe vereinfachter Modelle aus den Geometriedaten des betrachteten Hochstromwandlers abschätzen.

Nimmt man zunächst an, dass die Kopplungsinduktivitäten und Kapazitäten frequenzunabhängig sind, so lässt sich das Modell im Bild Ib mathematisch durch ein Deskriptorsystem darstellen:

$$m{E}_{\mathrm{CT}} \cdot \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \begin{pmatrix} m{i}_{\mathrm{L}} \\ m{u}_{\mathrm{LL}} \\ i_{\mathrm{s}} \\ u_{\mathrm{s}} \end{pmatrix} = m{F}_{\mathrm{CT}} \cdot \begin{pmatrix} m{i}_{\mathrm{L}} \\ m{u}_{\mathrm{LL}} \\ i_{\mathrm{s}} \\ u_{\mathrm{s}} \end{pmatrix} + m{g}_{\mathrm{CT}} \cdot \frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}t}.$$
 (1)

Dieses beschreibt den Zusammenhang zwischen den einzelnen Strömen innerhalb der Wicklungslagen, den verketteten Spannungen zwischen den Lagen und dem Sekundärstrom, sowie der Sekundärspannung.

Die Eigenschaften der Bürde können durch ein separates Deskriptorsystem (Gleichung (2)) erfasst werden, in dem der Vektor x<sub>B</sub> alle Zustandsgrößen des Bürdenkreises enthält.

$$E_{\mathrm{B}} \cdot \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \begin{pmatrix} x_{\mathrm{B}} \\ i_{\mathrm{s}} \\ u_{\mathrm{s}} \end{pmatrix} = F_{\mathrm{B}} \cdot \begin{pmatrix} x_{\mathrm{B}} \\ i_{\mathrm{s}} \\ u_{\mathrm{s}} \end{pmatrix}$$
 (2)

Je nach Art der Bürde unterscheiden sich dabei die Koeffizienten des beschreibenden Deskriptorsystems.

Koppelt man das Deskriptorsystem des Hochstromwandlers mit dem der Bürde, so lässt sich das Stromwandler-Bürden-System in Form eines Zustandsraummodells darstellen. Durch Eigenwertanalyse lassen sich aus diesem dann die Eigenfrequenzen des Hochstromwandlers bestimmen. Eine Transformation des Deskriptormodells in den stationären Frequenzbereich ermöglicht des Weiteren die Berechnung des Frequenzgangs des Hochstromwandlers.

Bild II zeigt am Beispiel eines praktisch eingesetzten Hochstromwandlers mit 9 Lagen das Berechnungsergebnis des Modells.

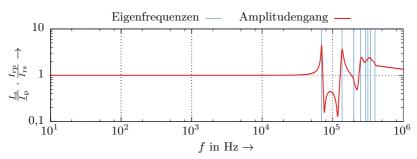


Bild II: Berechnetes frequenzabhängiges Übertragungsverhalten eines Hochstromwandlers mit n=9 Lagen bei rein ohmscher Bemessungsbürde

# Projekte zum Forschungsschwerpunkt "Planung und Betrieb von Netzen"



Rengin Idil Cabadag, M.Sc.

Reactive Power Capability of a Sub-Transmission Grid Using Real-Time Embedded Particle Swarm Optimization

Wind energy is one of the most competitive and efficient energy sources and, as a result, usage of it is continuously increasing worldwide. Although wind energy is relatively cheaper among the other renewables, it is also variable and uncertain. Therefore, the high penetration of wind energy causes several technical problems related to security, stability, power quality and operation of power systems. Transmission and Distribution System Operators (TSOs and DSOs) are issued to develop required grid codes for wind farms (WFs) considering a number of parameters to overcome those difficulties. In order to maintain the stability of power systems, WFs generally connected to 110 kV-sub-transmission system have to have an ability to contribute not only active power generation but also reactive power balance on the grid with proper reactive power management (RPM).

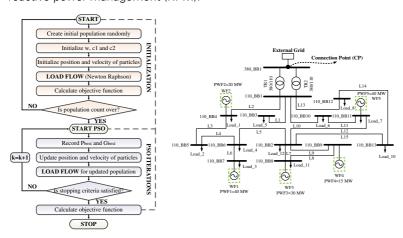


Figure I: Implementation of Figure II: A Typical German 110 kV-sub-trans-RTEPSO mission grid

Recently, WFs integrated into the grid are supposed to provide reactive power regulation capabilities at CP. In this paper, the main issues related RPM are to define the requested operation, plan actions to be implemented and calculate required reactive power at CP directly. In other words, the proposed

algorithm has to compromise required reactive power need at CP considering relevant dynamic interactions between the grid and WFs. Therefore, the objective function of this study was formulated to achieve desired amount of reactive power at CP using real-time data. In this context, system operators are able to define both exact amount of transferred reactive power into transmission grid and absorbed reactive power by sub-transmission grid. Reactive power at CP is varies depending mainly on generated reactive power by distributed WFs in over/underexcited operations at rated voltage.

This paper represents a Real-Time Embedded Particle Swarm Optimization (RTEPSO) to define optimal settings of WFs to meet reactive power requirements of a typical German 110 kV-sub-transmission grid at any time. In other words, the proposed approach searches the exact operation points of WFs to calculate required amount of absorbed/generated reactive power at Connection Point (CP) under consideration of Consumer Counting Arrow System.

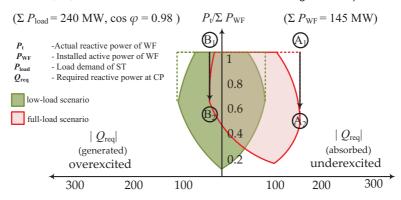


Figure III: Reactive Power Capability of a German 110 kV-sub-transmission Grid

Realtime Embedded Particle Swarm Optimization (RTEPSO):

- enable to find certain power factors and suitable settings of WFs at any time for any situation to provide desired absorbed/generated reactive power at CP within permissable voltage limits
- can be used for any P/Q characteristics of WFs under any conditions on the real grids
- can be installed into control centre of transmission system operators (TSOs)

Independent from specific system state, the optimal operational points of WFs can be found separately and requested operational actions are carried out for the real German 110 kV-sub-transmission-grid under Consumer Counting Arrow System.

[1] Cabadag, R.; Schmidt, U.; Schegner R: Istanbul-Reactive Power Capability of a Sub-Transmission Grid Using Real-Time Embedded Particle Swarm Optimization. ISGT Europe 2014, Istanbul, 2014



Jörg Dickert, Dipl.-Ing.

Neue Möglichkeiten des Demand-Side-Managements von Haushaltsgeräten

Haushaltsgeräte sollen durch Demand-Side-Management (dt. Verbrauchsmanagement, DSM) zur besseren Nutzung der fluktuierenden Erzeugung beitragen. Die Hemmnisse sind vielfältig und reichen vom Fehlen der Infrastruktur über ungeeignete Tarife und Rahmenbedingungen bis hin zu Komforteinbußen der Nutzer. Die Komforteinbußen können durch das Konzept des Quasi-DSM durch Speicherung von Elektrizität, Wärme bzw. Kälte deutlich reduziert werden. Im Haushaltsbereich sind die fünf klassischen DSM-fähigen Geräte Kühlschrank, Gefriergerät, Waschmaschine, Wäschetrockner und Geschirrspüler. Bei diesen Geräten ist ein Großteil des Energiebedarfs auf Wärme oder Kälte zurückzuführen. Daher stellt sich die Frage, ob die Energie in dieser Form gespeichert wird. Bei anderen Geräten ist das direkte DSM nicht möglich.

#### Erweiterte Möglichkeiten des DSM

DSM ist der Prozess, der die Menge oder das Verbrauchsmuster der durch die Endverbraucher konsumierten elektrischen Energie beeinflusst. Somit wird die Energiemenge beeinflusst, wohingegen beim Lastmanagement (engl. Demand Response) die Leistungsaufnahme im Focus steht.

Unter DSM wird vielfach die Verschiebung der Anwendung an sich verstanden. Dies wird hier *direktes DSM* genannt. Da DSM-fähige Geräte hauptsächlich Energie für Wärme oder Kälte benötigen, ist auch die Verwendung von Wärmespeichern möglich und somit findet ein Quasi-DSM statt. Dies kann mit Hilfe von *zentralen* Wärmespeichern, aber ebenso durch *dezentrale* und somit in dem jeweiligen Gerät integrierte Speicher geschehen. Ein DSM mit Batterie ermöglicht die Quasi-Verschiebung aller Geräte.

#### Direktes DSM

Beim direkten DSM wird die gesamte Nutzung verschoben. Der Start kann auf steuerungstechnologischer Basis, durch Tarife oder in Kombination beider Mechanismen durchgeführt werden. Zudem müssen die Geräte startbereit sein. Das heißt, dass die Waschmaschine beladen oder der Geschirrspüler eingeräumt ist. Der Nutzer wählt beim Einschalten nicht den sofortigen Start, sondern die Option DSM. Durch das nicht vorhersehbare Ende der Anwendung sind die Komforteinbußen sehr groß.

#### Quasi-DSM mit Batterie

Wenn Elektroenergiespeicher zukünftig zu wirtschaftlichen Konditionen verfügbar sein sollten, ist auch das Zwischenspeichern von Energie in Batterien denkbar. Damit lässt sich der Gebrauch aller Geräte quasi-verschieben.

#### Quasi-DSM mit zentralem Wärmespeicher

Quasi-DSM mit zentralem Wärmespeicher bedeutet den Anschluss von Geräten an das Trinkwarmwassersystem, welches über einen zentralen Warmwasserspeicher und einen zentralen Wärmeerzeuger bedient wird. Ist der Wärmeerzeuger mit dem Stromnetz gekoppelt (Heizstab, Wärmepumpe, BHKW), können Haushaltgeräte hierüber zum Quasi-DSM beitragen, indem sie am vorhandenen effizienten Wärmespeicher partizipieren. Gleichzeitig kann eine effiziente Wärmeerzeugung genutzt werden (z. B. Wärmepumpe kombiniert mit Solarthermie).

#### Quasi-DSM mit dezentraler Wärme- und Kältespeicherung

Dezentrale elektrische Trinkwarmwasserspeicher mit einem Speicherinhalt von 1 bis 101 sind bereits Stand der Technik. Hingegen sind dezentrale integrierte Wärmespeicher für Haushaltsgeräte bisher nicht auf dem Markt. Hier kann man sich vorstellen, kompakte und direkt im Gerät integrierte Speichereinheiten zu realisieren. Für die Speicherung sind Warmwasserspeicher sowie ebenso kompaktere Hochtemperaturfeststoffspeicher vorstellbar. Bei Waschmaschine, Geschirrspüler und Trockner könnte damit die benötigte Wärmeenergie für 1-2 Anwendungen vorgehalten werden. Weiterhin können Kühlund Gefriergeräte mit Latentkältespeichern ausgestattet werden, welche minimal unter die Phasenwechseltemperatur unterkühlt und damit aufgeladen werden, oder eine geringe Temperaturerhöhung über der Phasenwechseltemperatur zulassen (Entladen).

### Vergleich der DSM-Optionen

Die wesentlichen Kriterien für den Vergleich der DSM-Optionen sind Komfort und Kosten. Komforteinbußen werden vom Kunden nur akzeptiert, wenn dieser dadurch Kosten sparen kann. Somit sind diese beiden Faktoren miteinander gekoppelt. Zudem sollten aus technischer Sicht noch die verschiebbare Energie und die Verluste berücksichtigt werden

	Direkt	Batterie	Quasi-DSM Zentral	Dezentral	
Komfort	gering	hoch	hoch	hoch	
Verschiebbare Energie	mittel	hoch	geringer	geringer	
Verluste	keine	mittel	gering	mittel	
Kosten	aerina	sehr hoch		mittel	

Tabelle I: Vergleich der DSM-Optionen



Niels Erdmann, Dipl.-Ing.

Technologische Bewertung von Energieübertragungssystemen zur verstärkten Nutzung regenerativer Energieträger

Die deutsche Bundesregierung formulierte in ihrem Energiekonzept eine Gesamtstrategie, die den Weg in das Zeitalter der erneuerbaren Energien beschreibt. Eine der zentralen Zielsetzungen ist es, bis 2050 den Anteil der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien auf 80 % zu erhöhen. Damit verbunden ist die Integration von dargebotsabhängigen und somit fluktuierend einspeisenden Energieanlagen wie z. B. Photovoltaik und Windkraftwerke. Die aus energiewirtschaftlicher Sicht dringend notwendigen Ausbauvorhaben werden derzeit im Energieleitungsausbaugesetz auf 1877 km beziffert. Mit Stand zweites Quartal 2014 konnten davon erst 416 km realisiert werden. Ein Grund für diese Verzögerung ist u.a. die mangelnde Akzeptanz aufgrund der empfundenen Auswirkungen der Freileitungen auf die Natur.

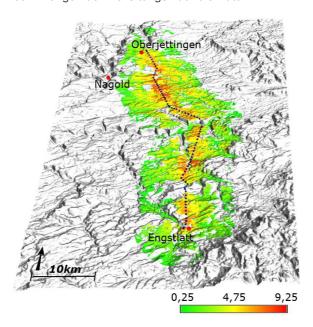


Bild I: Sichtbarkeitsanalyse der 380 kV-Freileitung zwischen Oberjettingen und Engstlatt

Zur Abschätzung des Einflusses eines Energieübertragungssystems auf die Umgebung können bereits getroffene Bewertungen genutzt werden. Dazu

eignen sich die ausgewiesenen Schutzgebiete nach Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) und die Landschaftsbewertung des Bundesamtes für Naturschutz (BfN). Um die Beeinträchtigung der umliegenden Anwohner abzubilden, wird zusätzlich eine Vektorkarte der Bevölkerungsdichte bis auf Ebene Verwaltungsgemeinschaft hinzugefügt.

Die Berechnungsgrundlage bildet das digitale Höhenmodell des Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer [1]. In diese Karte werden die Koordinaten der Freileitungsmasten importiert. Die Berechnung, Auswertung und Darstellung werden mit dem Geoinformationssystem GRASS GIS durchgeführt.

Die Sichtbarkeitsanalyse erfolgt zu Beginn für jeden Mast einzeln bis zu einem Radius von fünf Kilometern. Hierbei wird den mastnahen Punkten der Wert 1 zugewiesen, den weiter entfernten Punkten kleinere Werte (0,5 und 0,25). Die daraus resultierenden gewichteten Flächen aller Masten werden aufaddiert und bilden somit eine geländeabhängige Zone um den Verlauf der Trasse (vgl. Bild I). Der Wert an jedem Punkt der Zone ist ein Maß für die Anzahl und die Entfernung der sichtbaren Masten. In dieser Zone sind eventuell auch Waldflächen vorhanden, welche noch entfernt werden müssen. Die Koordinaten der Freileitungsmasten und die benötigten Waldflächen lassen sich aus Open Street Map mit Hilfe einer Scriptsprache exportieren.

Zur Auswertung werden die Karten der Schutzgebiete und die der Bevölkerungsdichte mit der sichtbaren Fläche überlagert. Die Ergebnisse der Beispielleitung (Donaumastbild, 50 m Höhe) zwischen Oberjettingen und Engstlatt sind der Tabelle I zu entnehmen.

Tabelle I: Auswertung der Sichbarkeitsanalyse

Kategorie	Absolut	Relativ
Gesamtfläche	23359 ha	100 %
Schutzgebiete nach BNatSchG	3271 ha	14,0 %
- Naturschutzgebiet	118 ha	0,5 %
- Landschaftsschutzgebiet	1185 ha	5,1 %
- Flora-Fauna-Habitat	1067 ha	4,6 %
- Vogelschutzgebiet	684 ha	2,9 %
- Naturpark	217 ha	0,9 %
Landschaft nach BfN	23359 ha	100 %
- Schutzwürdig	190 ha	0,8 %
- Schutzwürdig mit Defiziten	6422 ha	27,5 %
- Geringe naturschutzfachliche Bedeutung	16717 ha	71,7 %
Beeinträchtigte Einwohner	65833	

<sup>[1]</sup> U.S. Geological Survey, LAND PROCESSES DISTRIBUTED ACTIVE ARCHIVE CENTER, URL: https://lpdaac.usgs.gov/products/aster\_products\_table/astgtm, Stand: 14.04.2014



Marcus Kreutziger, Dipl.-Ing.

Potenziale von 110-kV-Verteilnetzen zur Bereitstellung von Blindleistung

Der Zubau regenerativer Erzeugungsanlagen (EZA) erfolgt perspektivisch zum Großteil in den Verteilnetzen und führt zu einer Reduzierung verfügbarer konventioneller Kraftwerksleistung im Übertragungsnetz. Dies wird zu veränderten Anforderungen bei der Bereitstellung von Systemdienstleistungen, wie der Spannungshaltung und somit der Bereitstellung von Blindleistung resultieren. Basierend auf diesem Hintergrund gilt es zu untersuchen in welcher Höhe 110-kV-Verteilnetze in der Lage sind Blindleistung bereit zu stellen.

Da die Einhaltung von Spannungsbändern eine lokal verteilte Bereitstellung von Blindleistung erfordert, ist eine detaillierte Prognose des Zubaus von EZAs nötig. Vor allem Windenergieanlagen sind auf Grund ihrer flächendeckenden Verbreitung für diese Aufgabe geeignet. Für die Zuordnung dieser Zubaupotenziale wurden bereits einige Studien bzw. Verfahren durchgeführt. Innerhalb eigener Untersuchungen wurde jedoch ein Verfahren verwendet, was die Grundideen mehrerer Studien verbindet. Datenbasis bildet die Analyse des technischen und wirtschaftlichen Potenzials von Windenergieanlagen in Sachsen des Lehrstuhls für Energiewirtschaft [1] der TU Dresden. Diese Potenziale wurden den 110-kV/20-kV-Verknüpfungspunkten zugeordnet. Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass zusammenhängende Windparks erst ab einer Größe von etwa 10 MW im Verteilnetz installiert werden. Der Zubau beginnt dabei mit dem wirtschaftlich günstigsten Standort. Die Zubaurate folgt dabei dem vorgegebenem Ausbaukorridor der Bundesregierung (EEG Reform 2014). So wird im Jahr 2024 etwa 2 GW installierte Leistung durch Windparks im sächsischen Verteilnetz vorhanden sein. Es ist festzustellen, dass sich die wirtschaftlich günstigen Standorte vor allem im Süden des Freistaates befinden.

Darauf aufbauend wird untersucht, welches Potenzial einzelne 110-kV-Verteilnetzgruppen haben Blindleistung für das Übertragungsnetz bereit zu stellen. Die Simulationen hierfür wurden mit DIgSILENT PowerFactory durchgeführt. Mit Hilfe eines implementierten Particle-Swarm-Algorithmus, wird der optimale Arbeitspunkt jedes Windparks im Netz bestimmt um sowohl maximal kapazitive als auch induktive Blindleistung bei unterschiedlichen Windbedingungen bereitzustellen. Dabei werden sowohl die Spannungsgrenzen an den Sammelschienen, als auch die Kennlinien der Erzeugungsanlagen als Randbedingungen berücksichtigt. In den folgenden Bildern sind die Kennlinien einer möglichen Blindleistungsübertragung in das Übertragungsnetz in Abhängigkeit der Einspeiseleistung der WEA dargestellt. Bild la zeigt dabei die Kennlinie für den Zubau nach der dena-Verteilnetzstudie (Szenario 1) und Bild Ib die Kennlinie für das entwickelte Verfahren (Szenario 2) für das Jahr 2024.

In Tabelle I sind die Kennzahlen der installierten WEA zusammengefasst. Das Netz entspricht dabei einem Netz mit typisch ländlicher Prägung.

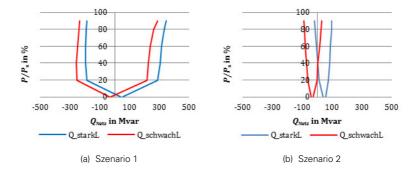


Bild I: Blindleistungsbereich 110-kV-Verteilnetzgruppe

Aus den Kennlinien ist ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Szenarien zu erkennen. Dies ist sowohl auf die unterschiedliche Höhe der installierten Leistungen als auch auf die Verteilung der Anlagen im Netz zurück zu führen. Eine Verteilung nach wirtschaftlich günstigen Standorten und einer Mindestgröße der Windparks für die Installation im 110-kV-Verteilnetz scheint sinnvoll, jedoch ist eine genaue Bestimmung der Ausbaustandorte aufgrund mangelnder Informationen zu Besitzverhältnisse der nutzbaren Flächen, Einzelgebäude wie Bauernhöfe auf Großflächen und das Vorkommen seltener Tierarten nicht möglich.

	<u> </u>		<u> </u>	
	Zubau	Bestand	Gesamt	Anzahl der
	in MW	in MW	in MW	Windparks
Szenario 1	522	123	645	15
Szenario 2	32	123	155	6

Tabelle I: WEA-Leistungen einer 110-kV-Verteilnetzgruppe

Unterschiede bei der Blindleistungsbereitstellung lassen sich auch aufgrund unterschiedlicher Versorgungsgebiete ausmachen. So ist das Verhalten von städtisch geprägten Netzen aufgrund höherer Lasten, einem höheren Vermaschungsgrad und geringerer Potenziale für WEAs aber einer größeren Anzahl konventioneller Kraftwerke grundlegend verschieden. Auf Grundlage dieser Analyse ist folglich eine Abhängigkeit der Blindleistungspotenziale von 110-kV-Verteilnetzen von der Versorgungsstruktur, WEA-Zubau, WEA-Verteilung, Lastsituation und Windgeschwindigkeit zu bestimmen.

[1] H. Hobbie, V. Schippers, M. Zipf und D. Möst, *Potenziale der Elektrizitätserzeugung aus erneuerbaren Ressourcen im Freistaat Sachsen*, Schriften des Lehrstuhls für Energiewirtschaft, Dresden, 2014



Uwe Schmidt, Dr.-Ing.

Einfluss des Fehlerortes auf den Erdschluss-Reststrom bei Resonanz-Sternpunkterdung

In Netzen mit Resonanz-Sternpunkterdung wird der Sternpunkt des Netzes über eine verstellbare Induktivität  $L_{\rm M}$  geerdet. In der Regel erfolgt die Erdung am Sternpunkt eines oder mehrerer Transformatoren (siehe Bild I).

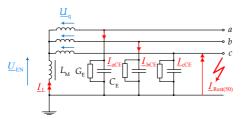


Bild I: Ersatzanordnung zur Beschreibung der Resonanz-Sternpunkterdung

Die Induktivität  $L_{\rm M}$  bildet dabei eine Parallel-Resonanz mit den Leiter-Erde-Kapazitäten  $3\cdot C_{\rm E}$  aus. Bei exakter Abstimmung:

$$3 \cdot j\omega \cdot L_{\rm M} = \frac{1}{j\omega \cdot C_{\rm E}} \tag{1}$$

verbleibt bei einem einpoligen Fehler (Erdschluss) ein Fehlerstrom, der bei 50-Hz-Erregung nur eine Wirkkomponente (Wirk-Reststrom:  $I_{\rm rw}$ ) aufweist. Der Betrag des Gesamt-Erdschluss-Reststromes  $I_{\rm Rest}$  bestimmt sich in Abhängigkeit der Dämpfung d, des Verstimmungsgrades v und den Anteilen von Oberschwingungsströmen  $I_{\rm v}$  zu Beziehung (2), wobei der Index v die Ordnungszahl der Harmonischen benennt.

$$I_{\text{Rest}} = I_{\text{CE}} \cdot \sqrt{d^2 + v^2 + \sum_{\nu} \left(\frac{I_{\nu}}{I_{\text{CE}}}\right)^2}$$
 (2)

Bei Ausbildung von Reihenresonanzen in der Nähe charakteristischer Harmonischer im Netz ist es möglich, dass der Anteil Harmonischer den Reststrom  $\underline{I}_{\mathrm{Rest}}$  dominiert. Eine zuverlässige Aussage zur Höhe des Erdschluss-Reststromes  $\underline{I}_{\mathrm{Rest}}$  an einer beliebigen Stelle des Netzes ist deshalb nur unter Kenntnis der frequenzabhängigen Impedanz  $\underline{Z}$  möglich, (SCHMIDT & SCHEGNER, [1]). Dominierende Resonanzstellen bilden das Mit- und Gegensystem sowie das Nullsystem aus. Für ein fiktives 110-kV-Netz mit zweiseitiger Einspeisung wird nachfolgend der Einfluss des Fehlerortes auf die Netzimpedanz aufgezeigt. Die gewählte Netzstruktur entspricht der vereinfachten Darstel-

lung eines realen 110-kV-Netzes. Im Modellnetz werden Stichleitungen vernachlässigt. Die Speisung des beispielgebenden 110-kV-Netzes erfolgt über

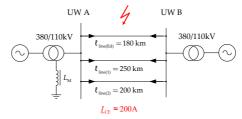


Bild II: 110-kV-Freileitungs-Ersatznetz

zwei Verknüpfungspunkte zur 380-kV-Netzebene. Die Kompensation des kapazitiven Erdschlussstromes  $\underline{I}_{\rm CE}$  erfolgt vereinfachend zentral. Im Bild III ist die Impedanz-Frequenz-Charakteristik bei Erdschlüssen bis zu einer Entfernung von  $\ell_{\rm Ed}=40\,{\rm km}$  von der Sammelschiene des UW A dargestellt.

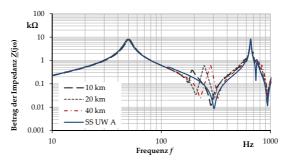
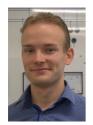


Bild III: Impedanz-Frequenz-Charakteristik bei Erdschluss im Zuge der Freileitung

Während bei Fehlern in Nähe der Sammelschiene eine dominierende Reihenresonanz bei einer Frequenz von  $f_{\rm e(r1)} \approx 300\,{\rm Hz}$  wirksam ist, wird in einer Entfernung von  $\ell_{\rm ed} \approx 40\,{\rm km}$  die dominierende Reihenresonanz bei  $f_{\rm e(r2)} \approx 250\,{\rm Hz}$  sichtbar. Auf die Ausprägung der Anteile der 5. und 7. Harmonischen der Netzfrequenz ergeben sich damit unterschiedliche Impedanzen. Aus dem Bild III wird die große Abhängigkeit des Erdschluss-Reststromes  $I_{\rm Rest}$  vom Fehlerort deutlich. Insbesondere auf den Reihenresonanzen des Mitsystems der beteiligten Netzelemente werden Stromüberhöhungen der jeweiligen Harmonischen wirksam werden. Dabei spielen beteiligte Leitungslängen, die Größe des kapazitiven Erdschlussstromes und die Netzkonfiguration die entscheidende Rolle.

[1] U. Schmidt, P. Schegner, Einfluss des Fehlerortes auf den Erdschluss-Reststrom bei Resonanz-Sternpunkterdung im 110-kV-Netz. 3. ETG-Fachtagung Sternpunktbehandlung in Netzen bis 110 kV, Nürnberg, 2014



Tobias Schnelle, Dipl.-Ing.

Modulare Netze - Neue Optionen für Planung und Betrieb von Verteilnetzen

Die politischen Rahmenbedingungen der vergangenen Jahre hatten einen rasanten Zubau umrichtergespeister dezentraler Erzeugungsanlagen im Verteilnetz zur Folge. Deren volatile Erzeugung führt dabei zu weitreichenden neuen Anforderungen an Netzplanung und -betrieb. Größere Wind- und Solarparks werden vorrangig in der Hoch- und Mittelspannungsebene angeschlossen. Durch die unbeständige Auslastung der Netze ist auch deren Blindleistungsbedarf unstetig, wodurch die Spannungshaltung in den betroffenen Spannungsebenen erschwert wird. Die im Niederspannungsnetz angeschlossenen PV-Anlagen können hingegen zu einer Umkehr der Lastflussrichtung führen und dadurch häufige Verletzungen des zulässigen Spannungsbandes hervorrufen. Im heutigen Energieversorgungssystem sind die Merkmale der Spannungsqualität zwischen den einzelnen Spannungsebenen gekoppelt. Um dem Endverbraucher die vorgeschriebene Versorgungsqualität bereitzustellen, sind daher hohe Qualitätsvorgaben in allen Spannungsebenen einzuhalten.

Aufgrund der hohen Nachfrage an leistungselektronischen Komponenten und deren kontinuierlicher Weiterentwicklung sind deren leistungsbezogenen Kosten in den vergangenen Jahren stetig gesunken. Dies ermöglicht es, zukünftig neue Anwendungsfelder leistungselektronischer Umrichter für den Einsatz im Verteilnetz zu erschließen. Dazu wurde ein Konzept erstellt, mit dessen Hilfe die geforderte Versorgungsqualität gezielt endverbrauchernah bereitgestellt werden kann. Wie in Bild I dargestellt, wird ein Teilnetz vom

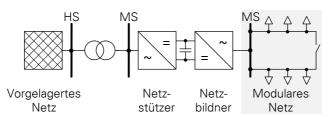


Bild I: Schematische Darstellung eines über leistungselektronische Umrichter entkoppelten Modularen Netzes

vorgelagerten Netz mit Hilfe eines Umrichtersystems entkoppelt. Eine geeignete Möglichkeit stellt dabei die dargestellte Back-to-Back-Anordnung zweier spannungsgeführter Umrichter mit Gleichspannungszwischenkreis dar. Der mit dem vorgelagerten Netz verbundene Umrichter wird als Netzstützer bezeichnet und übernimmt die Aufgabe, die Zwischenkreisspannung durch Be-

zug von Wirkleistung stabil zu halten. Gleichzeitig kann die Spannungshaltung im vorgelagerten Netz durch Blindleistungsbezug oder -lieferung unterstützt werden. Der Netzbildner gibt Frequenz und Spannung im als Modulares Netz (MN) bezeichneten Teilnetz vor. Im Gegensatz zu Microgrids wird das MN nur mit Hilfe der vom vorgelagerten Netz übertragenen Wirkleistung gebildet. Dadurch besteht kein Bedarf an Mindesterzeugungsleistung und erforderlichen Speichersystemen innerhalb des MN.

Aufgrund der Entkopplung ergeben sich zahlreiche neue Optionen für die Planung und den Betrieb von Verteilnetzen. So können im vorgelagerten Netz größere Spannungsabweichungen zugelassen werden, wodurch der Aufwand zur Spannungshaltung reduziert werden kann. Zusätzlich wird dem Netzbetreiber durch das implementierbare STATCOM-Verhalten eine direkte Möglichkeit zur Blindleistungssteuerung im vorgelagerten Netz gegeben, ohne dabei Anlagenbetreiber einbinden zu müssen. Innerhalb des MN wird die Spannung im einfachsten Fall auf einen festen Sollwert an der Sammelschiene geregelt. Zusätzlich ist es möglich, den Spannungssollwert in Abhängigkeit des Lastflusses zu ermitteln oder über eine Weitbereichsregelung vorzugeben. Durch die Entkopplung der Spannungsschwankungen des vorgelagerten Netzes kann das gesamte zulässige Spannungsband nach [1] innerhalb des Modularen Netzes ausgeschöpft werden. Dadurch kann der Anteil dezentraler Einspeiser vergrößert werden, ohne das vorhandene Netz auszubauen.

Da das MN nicht über Synchrongeneratoren gespeist und darin der Anteil synchron verbundener Lasten als vernachlässigbar gering angenommen wird, stellt die Frequenz kein Kriterium für ein Leistungsgleichgewicht dar und kann somit als unabhängiger Parameter vom Netzbildner vorgegeben werden. Da das Frequenzsignal im gesamten MN gleich und mit einfachen technischen Mitteln zu bestimmen ist, eignet es sich als kostengünstiger Echtzeit-Kommunikationskanal. Die für Netze ohne synchrone Verbindung zum Verbundnetz zulässige dauerhafte Abweichung der Nennfrequenz, welche als Bandbreite des Steuersignals verwendet werden kann, beträgt  $f_{\rm n}=49\,{\rm Hz}\dots$ 51 Hz. Durch das Hinterlegen einer frequenzabhängigen Leistungskennlinie in der Regelung von dezentralen Einspeisern und steuerbaren Lasten sowie der Frequenzvorgabe durch den Netzbildner kann der Netzbetreiber die Leistungsbilanz des MN gezielt beeinflussen. Das Modulare Netz kann somit ohne zusätzliche kommunikationstechnische Anbindung einen Beitrag zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen liefern.

[1] DKE, DIN EN 50160:2011-02 Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2011.

### Projekte zum Forschungsschwerpunkt "Power Quality"



Ana Maria Blanco, M.Eng.

Assessment of diversity indices for time-varying harmonic currents

One of the key aspects of a realistic harmonic analysis is a correct representation of summation of harmonic currents. The presence of different devices with different circuit topologies at one connection point can cause a diversity of current harmonic phase angles, which results in a magnitude of vectorial sum that is smaller than the arithmetical sum of the individual harmonic current magnitudes. This is known as *diversity effect* and has a high influence on the total harmonic distortion emitted by larger groups of non-linear devices.

Commonly the diversity factor  $k_{\rm p}^{(h)}$  and the summation exponent  $\alpha^{(h)}$  are used to quantify this effect:

$$k_{\mathrm{p}}^{(h)} = \frac{\text{Vectorial sum}}{\text{Arithmetic sum}} = \frac{I_{\mathrm{VEC}}^{(h)}}{I_{\mathrm{ARI}}^{(h)}} = \frac{\left|\sum\limits_{i=1}^{n} \underline{I}_{i}^{(h)}\right|}{\sum\limits_{i=1}^{n} \left|\underline{I}_{i}^{(h)}\right|} \qquad I_{\mathrm{VEC}}^{(h)} = \sqrt[\alpha]{\sum\limits_{i=1}^{n} \left|\underline{I}_{i}^{(h)}\right|^{\alpha}} \quad (1)$$

 $\underline{I}_i^{(h)}$  represents the harmonic current phasor of an individual device i, n is the total number of harmonic devices and h the considered harmonic order.  $k_{\mathrm{p}}^{(h)}$  varies between 0 (perfect cancellation) and 1 (no cancellation) while  $\alpha^{(h)}$  varies between 1 (no cancellation) and infinite. Both indices only have a physical meaning if they are calculated for a single time instant.

Variation of network parameters as well as number and type of operated loads and generators results in time-varying harmonic currents, which requires an additional statistical post-processing in order to obtain (aggregated) diversity indices. The statistical post-processing depends on the following factors, which may have a considerable impact on the calculated index:

- 1. Aggregation interval (e.g. 1 minute, 10 minute, ...),
- 2. Aggregation method (e.g. Maximum values, RMS-values, ...),
- 3. Observation interval (e.g. 1 day, 1 week, ...)
- 4. Assessment percentile (e.g. 95th-percentile, 99th-percentile, ...)
- 5. Statistical calculation method (e.g. based on current c.d.f.'s, based on diversity index c.d.f.'s, ...)

Besides the above mentioned factors, the accuracy of the calculated diversity indices is also closely linked to the accuracy of the measurement instruments and the correct clock synchronization between parallel measurements at different locations.

This study analyses the impact of those issues on the accurate and reliable assessment of diversity indices in presence of time-varying harmonic

currents. The analysis is based on exactly synchronized current harmonic measurements (10-period-values) with high accuracy in a MV/LV substation with residential and commercial users.

A detailed discussion of all impact factors can be found in [1]. As example the impact of the *Aggregation intervals* is presented here. Three different cases are distinguished: No aggregation (10-period-values), 1-min-aggregation and 10-min-aggregation. The aggregation of harmonic magnitudes is performed according to IEC 61000-4-30 (RMS value). No standard exists for the aggregation of harmonic phase angles. Based on common practice, the phase angle of the resulting vectorial sum of harmonic currents is used as the aggregated value.

Fig. 1 shows the variation of  $k_{\rm p}^{(h)}$  and  $\alpha^{(h)}$  for the first odd harmonics of phase A. Similar results were obtained for phases B and C. Each bar represents the range of all diversity indices between 1st to 99th percentile calculated for two days. Harmonics up to 9th order show a low diversity  $(k_{\rm p}^{(h)}>0.8,$   $\alpha^{(h)}<1.2)$  due to the similarity of harmonic phase angles over the time. Higher harmonics have higher variation of diversity indices and show sometimes a better harmonic cancellation  $(k_{\rm p}^{(h)}<0.7,$   $\alpha^{(h)}<1.4)$ .

The different aggregation intervals do not show a significant impact on the results for harmonics up to 9th order. The blue bar represents the variation without aggregation and can serve as reference. The size of the bars changes slightly for those harmonics and the 99th percentile of  $k_{\rm p}^{(h)}$  (1st percentile of  $\alpha^{(h)}$  respectively) remains practically unaltered. However, the variation increases slightly for higher harmonics. E.g. the 17th harmonic shows a change in  $\alpha^{(h)}$  of approximately 0.2 units between the results without aggregation and 10-min-aggregation. This difference could become considerable for higher harmonics and seems to be linked to the fact that the diversity of harmonic phase angles increases with the order of the harmonic.

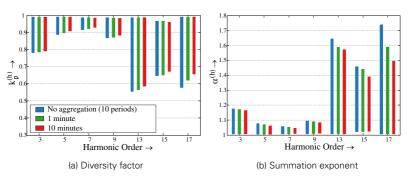


Figure I: Variation of diversity indices due to different aggregation intervals

[1] A.M. Blanco, J. Meyer, P. Schegner, Calculation of phase angle diversity for timevarying harmonic currents from grid measurement. ICREPQ, Spain 2014.



Max Domagk, Dipl.-Ing.

Identifikation von Trends in Langzeitmessungen der Strom- und Spannungsqualität

Langsame und globale Entwicklungen bedingen langfristige Veränderungen bei Abnehmer-, Erzeuger- und Netzstruktur, die sich über mehrere Jahre erstrecken können (z. B. Einsatz neuer Technologien wie Energiesparlampen). Dies kann zu positiven oder negativen Trends der Strom- und Spannungsqualität führen, welche es möglichst frühzeitig zu identifizieren gilt. So lässt sich bspw. abschätzen, ob Maßnahmen zu ergreifen sind, welche die zukünftige Einhaltung von Grenzwerten gewährleisten. Im Verlauf der Zeitreihen existieren neben möglichen Trends mehr oder weniger regelmäßige Schwankungen, deren Gründe hauptsächlich im variierenden Verhalten von Nutzern und Erzeugung liegen. Ein Beispiel dafür sind saisonale Schwankungen der Strom- und Spannungsqualität, die sich über ein Jahr erstrecken können. Für die systematische Analyse dieser Einflüsse eignet sich das additive Komponentenmodell der klassischen Zeitreihenanalyse. In Abhängigkeit der Beobachtungsdauer können verschiedene Komponenten eingesetzt werden, um die Zeitreihe zu modellieren. Ein mögliches Komponentenmodell zur Identifikation von Langzeittrends in Zeitreihen, welche aus einem Wert je Woche bestehen, beinhaltet drei Komponenten:

- Trendkomponente (mehrere Jahre)
- Saisonkomponente (mehrere Monate)
- Restkomponente (z. B. Ausreißer und Einzelereignisse)

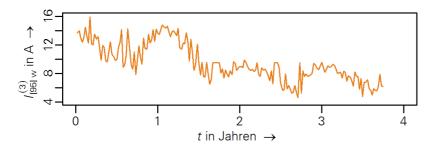


Bild I: Wochenweise berechnete 95-%-Quantile für die 3. Stromharmonische einer Mehrfamilienhaussiedlung; Dezember 2010 bis September 2014

Die Trendkomponente soll hierbei die langfristige, systematische Veränderung mittleren Niveaus nachbilden. Mit Hilfe der Saisonkomponente werden die jahreszeitlich bedingten Schwankungen erfasst und die Restkomponente

beinhaltet Ausreißer und Unregelmäßigkeiten, die nicht näher erklärt werden können (*Rauschen*). Anhand der Zeitreihe in Bild I sind diese drei Bestandteile bereits gut erkennbar.

Um Trends in Zeitreihen zu identifizieren, können globale oder lokale Komponentenmodelle eingesetzt werden. Für den globalen Ansatz wird eine Vermutung über den funktionalen Zusammenhang der Trendentwicklung vorausgesetzt (z. B. eine Trendgerade). Das lokale Komponentenmodell geht davon aus, dass ein aktueller Wert von den benachbarten Beobachtungswerten beeinflusst wird, erfordert jedoch keine Annahmen für funktionale Zusammenhänge. Es wird z. B. vom statistischen Bundesamt angewendet, um die Saisonbereinigung der Arbeitslosenquote durchzuführen.

Der lokale Komponentenmodell ist ebenfalls zur Identifikation von Trends in Langzeitmessungen von Strom- und Spannungsqualitätsmessungen geeignet. Im Wesentlichen entspricht das angewendete Verfahren einer zweifachen Filterung der Zeitreihe um diese zu glätten. Im ersten Schritt erfolgt die Filterung mit einer Fensterbereite von einem Jahr um die saisonalen Schwankungen zu eliminieren. Anschließend wird die saisonbereinigte Zeitreihe mit einer Fensterbreite von zwei Jahren gefiltert um den Trend zu extrahieren. Saison- und Trendkomponente für die Beispielzeitreihe in Bild I sind in Bild II dargestellt. Die Restkomponente entspricht der Differenz zwischen der Originalzeitreihe (Bild I) und der Addition aus Saison- und Trendkomponente. Die Ergebnisse hängen von Art und Parametrierung der eingesetzten Filter ab. Inwieweit die lokalen Modelle auch für die Prognose künftiger Trendentwicklungen von Strom- und Spannungsqualität geeignet sind, ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.

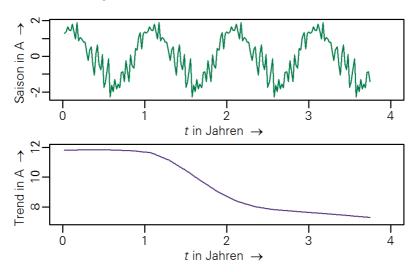


Bild II: Saisonkomponente und Trendkomponente der Zeitreihe in Bild I



Etienne Gasch, Dipl.-Ing.
Webbasierte Auswertung von
Spannungsqualitätsmessungen

Immer mehr Elektroenergieversorgungsunternehmen führen Messungen zur Bewertung der Spannungsqualität durch. Neben Messungen aufgrund von Kundenbeschwerden führen Netzbetreiber zunehmend Messungen durch, um die mittlere Spannungsqualität in ihren Netzen zu beurteilen (Messkampagnen). Neben der aktuellen Reserve zu den vorgegebenen Grenzwerten sind die Netzbetreiber auch an der frühzeitigen Erkennung langsamer, langfristiger Änderungen interessiert. Deshalb werden immer mehr Messgeräte dauerhaft installiert, was zu neuen Herausforderungen im Hinblick auf Verwaltung und Auswertung der Messdaten führt. Zum einen werden sehr unterschiedliche Geräte verschiedenster Hersteller zur Messung eingesetzt. Das können dedizierte Power Quality Messgeräte nach IEC 61000-4-30 Klasse A oder auch Zähler der neuesten Generation mit integrierter Power Quality Erfassung sein. Jedes Gerät verfügt über sein eigenes Datenformat und eine gemeinsame Auswertung der Messdaten ist erst nach einer zusätzlichen, zeitaufwändigen Konvertierung in ein messgeräteunabhängiges Format möglich. Zum anderen generieren diese Messungen eine ständig wachsende Anzahl an Messdaten, deren Auswertung sehr zeitaufwendig und manuell nur schwer zu bewältigen ist. Die mit den Messgeräten mitgelieferte Messgerätesoftware ist für einzelne, individuelle Auswertungen (z. B. bei Beschwerdemessungen) gut geeignet, für Messkampagnen hingegen nur schwer oder gar nicht nutzbar. Die vollständige manuelle Sichtung der Daten ist bei größeren Messkampagnen praktisch unmöglich und aufgrund der fast immer innerhalb der Grenzwerte liegenden Spannungsqualität unnötiger Zeitaufwand. Während plötzliche Änderungen der Spannungsqualität prinzipiell noch erkennbar wären, sind Langzeittrends durch manuelle Datensichtung ohne weitere Auswertetools praktisch nicht erkennbar.

Aus diesem Grund wird am Institut eine Software entwickelt, welche Messdaten automatisiert sichtet und dem Benutzer über sogenannte Assistenzfunktionen Unterstützung bei der übersichtlichen Auswertung großer Datenmengen bietet. Die Software besteht aus einer Datenbank und einer Auswertekomponente (Bild I). Die Datenbank speichert die Messdaten in einem von den eingesetzten Messgerätetypen unabhängigen Format. Dies ermöglicht eine einheitliche Auswertung aller Messdaten unabhängig vom eingesetzten Messgerät. Die Auswertekomponente besteht aus einer interaktiven Webanwendung. Dadurch ist keine lokale Softwareinstallation beim Benutzer nötig. Es ist nur ein Javascript fähiger Internet-Browser erforderlich.

Neben Standardfunktionalitäten, wie bspw. der Anzeige von Zeitverläufen einzelner Spannungsqualitäts-Kenngrößen werden die am Institut speziell für



Bild I: Programmfenster der Internetanwendung

große Datenmengen entwickelten Bewertungsindizes (Qualitäts-Index, Risiko-Index, Schwankungs-Index und Trend-Index) verwendet. Die Indizes haben den Vorteil, dass sie sich sowohl für verschiedene Kenngrößen als auch Messorte flexibel zusammenfassen lassen. So ist es unabhängig von Anzahl der Messorte und Messwochen immer möglich einen einzelnen Wert für jeden Index zu berechnen (Chef-Kennzahl). Von diesem ausgehend kann schrittweise der Detaillierungsgrad erhöht werden, bis schließlich auf der untersten Ebene die Zeitverläufe erreicht werden. Diese Art der Auswertung wird auch als Top-Down-Ansatz bezeichnet und ist vor allem für die Auswertung langer Zeiträume bei vielen permanent installierten Messgeräten unerlässlich. Wichtig ist dabei auch die interaktive Navigation zwischen den verschiedenen Aggregierungsebenen (Gesamtnetz, Messort, Kenngröße). Beim Qualitäts-Index stellt bspw. jeder Wert eine sogenannte Qualitätsreserve dar, der die minimale Reserve zum Grenzwert für alle betrachteten Messorte. Messwochen und Qualitätskenngrößen angibt. Je nach Größe der vorhandenen Qualitätsreserve unterstützt eine farbliche Unterlegung (z.B. grün bei mehr als 50 % Reserve) die Interpretation der Werte auch für Personen, die nicht mit der Beurteilung der Spannungsqualität vertraut sind. In Bild I sind beispielhaft im Fenster Quality Index die farblich unterlegten Indizes für verschiedenen Qualitätskenngrößen (Spalten) und Messorte (Zeilen) dargestellt. Sind für einen Messort mehrere Wochen verfügbar, wurden diese entsprechend aggregiert. Der Netzindex ist in der linken oberen Ecke angeordnet. Durch Klick auf einen Index würde sich im nächsten Detaillierungsgrad bspw. der Zeitverlauf der ausgewählten Qualitätskenngröße am entsprechenden Messort (Ax) öffnen.



Matthias Klatt, Dipl.-Ing.

Vergleich von Verfahren zur messtechnischen Bewertung höherfrequenter Emission im Frequenzbereich von 2 kHz bis 150 kHz

Zur Verbesserung der Energieeffizienz arbeiten immer mehr elektronische Geräte mit höheren Schaltfrequenzen und emittieren auf Grund ihrer Funktionsweise netzseitig Ströme im Frequenzbereich von 2 kHz bis 150 kHz. Außerdem wird für die Kommunikation mit Energiezählern europaweit in vielen Fällen Schmalband Powerline Communication (PLC) eingesetzt, die ebenfalls im oben genannten Frequenzbereich arbeitet. Diese höherfrequenten Emissionen können benachbarte Geräte beeinflussen und unerwünschte Funktionsstörungen hervorrufen, die in Extremfällen bis hin zum Ausfall führen. Um den reibungslosen, gleichzeitigen Betrieb aller Geräte im Niederspannungsnetz zu ermöglichen, müssen die Emissionen potentieller Störquellen und die Störfestigkeit aller Geräte miteinander koordiniert und im Rahmen der Normung Grenzwerte festgelegt werden. Im Frequenzbereich von 2 kHz bis 150 kHz wurde dies in den letzten Jahren begonnen, gestaltet sich aufgrund verschiedener Interessenlagen jedoch als schwierig. Als wichtiger Schritt auf diesem Weg wurden in diesem Jahr in der neu erstellten IEC 61000-4-19 die Störfestigkeitspegel für Geräte am Niederspannungsnetz für diesen Frequenzbereich festaeleat.

Die Grundlage für Messungen aktueller Pegel im Netz, sowie den Nachweis der Einhaltung vorgegebener Emissionsgrenzwerte sind genaue, reproduzierbare und vergleichbare Messwerte. Dazu muss ein geeignetes Messverfahren festgelegt werden. Seit 2008 gibt es einen Vorschlag für ein Messverfahren für den Frequenzbereich von 2 kHz bis 9 kHz im informativen Anhang zur IEC 61000-4-7. In der dritten Ausgabe der IEC 61000-4-30 wird ein alternatives Messverfahren vorgeschlagen, welches deutlich geringere Ansprüche an die Leistungsfähigkeit des Messgerätes stellt, und sich folglich kostengünstiger realisieren lässt. Im Rahmen einer Studie wurden beide Messverfahren miteinander verglichen und deren Vor- und Nachteile identifiziert.

Um eine größtmögliche Genauigkeit bei der Messung der höherfrequenten Anteile zu erreichen, müssen aus dem Signal die niederfrequenten Anteile entfernt werden. Dies kann mit einem geeigneten Hochpass-Filter geschehen. Wird kein Filter eingesetzt, so können die Messergebnisse unter bestimmten Umständen bis zur praktischen Unbrauchbarkeit verfälscht werden. Das Filter kann sowohl als Hardware (analog) oder Software-Lösung (digital) realisiert werden. Der Frequenzgang dieses Filterentwurfs ist im Bild I dargestellt. Ein Prototyp des Filters wurde aufgebaut und erfolgreich getestet.

Eine Grundvoraussetzung für die Vergleichbarkeit der Messdaten ist eine einheitliche Bandbreite bei der Messung. Die vorgeschlagenen Verfahren verwenden jedoch verschiedene Bandbreiten von 200 Hz und 2 kHz, welche zu

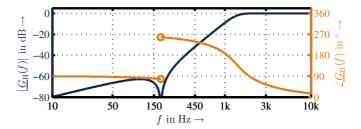


Bild I: Frequenzgang eines geeigneten Hochpass-Filters

deutlich unterschiedlichen Messergebnissen führen können. Dies wird im Bild II veranschaulicht. Für das gleiche Signal sind die Ergebnisse mit 200 Hz und 2 kHz Bandbreite dargestellt. Das Signal enthält einen im Vergleich zu den Messbandbreiten schmalbandigen Anteil, welcher von einem Photovoltaik-Wechselrichter hervorgerufen wird (bei 20 kHz). Der Unterschied zwischen den Messverfahren, dargestellt in der Detailansicht im Bild II, ist für diesen Signalanteil relativ gering. Zusätzlich enthält das Signal im Verhältnis zu den Messbandbreiten breitbandige Anteile, welche von PLC-Sendern hervorgerufen werden (zwischen 35 kHz und 90 kHz). Hier ist der Unterschied wesentlich größer. Er beträgt 10 dB, was in etwa einem Faktor 3 entspricht. Bei unterschiedlichen Bandbreiten können die Messergebnisse erheblich voneinander abweichen, so dass für die Vergleichbarkeit der Messergebnisse unbedingt eine einheitliche Bandbreite für alle Messverfahren festgelegt werden muss.

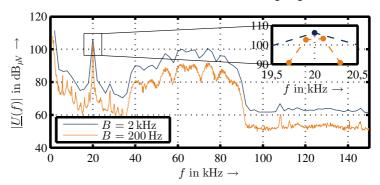


Bild II: Vergleich einer Messung mit unterschiedlichen Messbandbreiten

Die ausführlichen Ergebnisse der Untersuchung wurden im Rahmen einer internationalen Konferenz vorgestellt [1] und betreffenden Gremien bei IEC und CENELEC zur Verfügung gestellt.

[1] M. Klatt, J. Meyer, P. Schegner: Comparison of measurement methods for the frequency range of 2 kHz to 150 kHz, 16th IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2014



Jan Meyer, Dr.-Ing.

Messtechnische Analyse der Flickerausbreitung bei Dreiwicklungstransformatoren

Lastsprünge rufen an der Netzimpedanz Spannungsänderungen hervor. Einzelne, große Spannungsänderungen können zur Störung anderer Geräte führen. Häufige Spannungsänderungen kleiner Amplitude können Leuchtdichteänderungen bei Lampen (Flicker) hervorrufen, welche das menschliche Wohlbefinden erheblich beeinträchtigen können. Um diese Beeinflussungen zu vermeiden, sind relative Spannungsänderung d sowie Flickerstärke  $P_{\rm st}$  (Kurzzeit-Flickerstärke), welche durch ein Gerät oder eine Kundenanlage hervorgerufen werden, zu begrenzen. Spannungsänderung und Flickerstärke reduzieren sich wirksam in Richtung höherer Kurzschlussleistung (Aufwärtstransfer). Dagegen wirken sich die beschriebenen Effekte auf alle von der störenden Anlage aus in Abwärtsrichtung angeschlossenen Kunden praktisch ungedämpft aus (Abwärtstransfer).

Eine effektive Lösung zur Vermeidung unzulässiger Rückwirkungen auf andere Kunden ist der exklusive Anschluss einer Anlage mit hoher Störaussendung über einen eigenen Transformator. Spannungsänderungen und Flicker auf der Primärseite reduzieren sich je nach dem Kurzschlussleistungsverhältnis zwischen Primär- und Sekundärseite  $S_{\rm kV\,sek}/S_{\rm kV\,pri}$  auf Werte, die teils deutlich unter 20 % liegen.

Unter bestimmten Umständen bietet es sich aus wirtschaftlichen Überlegungen heraus an, anstelle eines eigenen Zwei-Wicklungstransformators für die störende Anlage einen Dreiwicklungstransformator einzusetzen, welcher auf der Tertiärseite einen weiteren Kunden versorgen kann. Bild I illustriert dies anhand eines konkreten HS/MS-Beispiels.

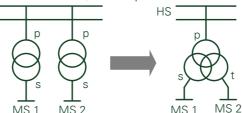


Bild I: Mögliche Anschlussvarianten für 2 Kundenanlagen MS 1 und MS 2

Im Rahmen einer Studie wurde untersucht, ob und um wieviel sich die Störaussendung zwischen den Mittelspannungsseiten eines vorgegebenen Dreiwicklungstransformators reduziert. Da zwischen Spannungsänderung und Flickerstärke ein direkter Zusammenhang besteht, wurde nur die Übertragung der relativen Spannungsänderung untersucht. Dazu erfolgten umfangreiche

Messungen an einem bereits in Betrieb befindlichen Dreiwicklungstransformator, an dessen Sekundärseite (MS 1) eine Kundenanlage angeschlossen war, welche deutliche Spannungsänderungen versursachte. Bild II zeigt beispielhaft eine dreiphasige Spannungsänderung auf der Sekundärseite und die zugehörige Spannungsänderung auf der Tertiärseite (MS 2).

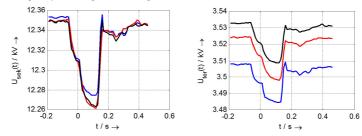


Bild II: Verlauf der Spannungsänderung bei sekundärseitigem Ereignis (L1: blau; L2: rot; L3: schwarz)

Für jedes Ereignis wurde die relative Spannungsänderung d auf beiden Seiten bestimmt und für alle gemessenen, mehr als 200 Ereignisse in einem Diagramm dargestellt (Bild III).

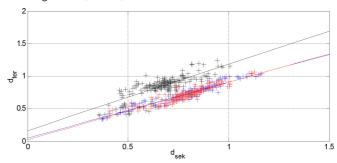


Bild III: Auswirkung sekundärseitiger Spannungsänderungen auf die Tertiärseite (L1: blau; L2: rot; L3: schwarz)

Der sogenannte Transferkoeffizient quantifiziert die Übertragung einer Spannungsänderung zwischen zwei beliebigen Punkten im Netz. Beträgt sein Wert T=0, so findet keine Übertragung statt, beträgt der Wert T=1, wird die Spannungsänderung ohne Dämpfung übertragen. Der Transferkoeffizient entspricht dem Anstieg der Regressionsgeraden in Bild III und beträgt für L1 und L2  $T_{\rm sek \to ter}=0.87$ . Eine Bestimmung für L3 ist aufgrund der vergleichsweise großen Streuung der Messwerte nicht vertrauenswürdig.

Der untersuchte Dreiwicklungstransformator weist aufgrund seiner verhältnismäßig kleinen Impedanz zwischen Sekundär- und Tertiärwicklung nur eine sehr geringe Dämpfung (ca. 13 %) auf. Es kann somit nur der Einsatz eines Dreiwicklungstransformators mit deutlich höherer Impedanz zwischen Sekundär- und Tertiärwicklung empfohlen werden.



Friedemann Möller, Dipl.-Ing.

Simulationsumgebung zur Analyse der Unsymmetrie durch einphasige Ladung von Elektrofahrzeugen

Der Großteil der in Deutschland zugelassenen Elektrofahrzeuge (> 75 % [1]) besitzt einen einphasigen fahrzeugseitigen Ladegleichrichter. Durch die einphasige Ladung kommt es zu einer unsymmetrischen Belastung, welche einen negativen Einfluss auf die Spannungsunsymmetrie haben kann. Folgen einer hohen Spannungsunsymmetrie sind u.a. höhere Verluste in rotierenden elektrischen Maschinen und die Entstehung nicht charakteristischer Harmonischer z. B. bei sechspulsigen Stromrichtern.

Um die Folgen einer Zunahme an Elektrofahrzeugen auf die Spannungsunsymmetrie abzuschätzen und Varianten zur Minimierung des Einflusses auf die Spannungsunsymmetrie zu untersuchen, wurde eine Simulationsumgebung entwickelt, welche aus einem unsymmetrischen Netzmodell, je einem Modell für die Elektrofahrzeuge und die Photovoltaikanlagen sowie einem unsymmetrischen Haushaltslastmodell besteht.

Das Modell für die Elektrofahrzeuge bildet sowohl die Abhängigkeit des Ladestroms verschiedener Fahrzeugtypen von der Ladedauer auch als auch von der Höhe der Versorgungsspannung nach (siehe [2]). Bild I zeigt, dass die Abhängigkeit des Ladestroms von der Versorgungsspannung in zwei Bereiche eingeteilt werden kann. Ist die Versorgungsspannung kleiner als eine fahrzeugabhängige Spannung  $U_{\rm T}$  so erfolgt eine stromkonstante Ladung andernfalls eine scheinleistungskonstante Ladung. Ebenfalls wurde die nachgewiesene Abhängigkeit der Blindleistung vom momentanen Ladestrom berücksichtigt. Das Simulationsmodell basiert auf Labormessungen zwölf verschiedener Fahrzeugtypen und wurde anhand durchgeführter Netzmessungen verifiziert.

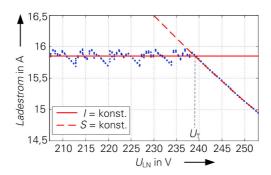


Bild I: Abhängigkeit des Ladestroms von der Versorgungsspannung

Das unsymmetrische Haushaltslastmodell wurde basierend auf Haushaltsmessungen und bereits durchgeführten Studien (wie z. B. [3]) entwickelt. Dabei wurden zeitpunktabhängige Verteilungsfunktionen ermittelt mit denen die Haushaltslast je Zeitpunkt bestimmt und auf die drei Phasen verteilt wird. Das Netzmodell des Niederspannungsnetzes ist als unsymmetrisches Vierleitermodell aufgebaut. Neben der Netzimpedanz wird für das übergeordnete Netz eine vorhandene Spannungsunsymmetrie berücksichtigt, welche basierend auf einer aus Messungen bestimmten Verteilungsfunktion modelliert wird.

Die Kombination aller drei Modelle erlaubt die realistische Simulation von Lastfluss und Spannungsunsymmetrie in Niederspannungsnetzen mit hohem Anteil an Haushaltslasten und einer variierenden Durchdringung mit Elektrofahrzeugen und Photovoltaikanlagen.

Für die Verifikation der Simulationsumgebung wurde der Abgang eines Wohngebietes mit ca. 280 Haushalten und zehn Elektrofahrzeugen gleichzeitig gemessen und basierend auf den entwickelten Modellen simuliert. Bild II zeigt den Vergleich der Summenhäufigkeiten der Gesamtwirkleistung sowie der Spannungsunsymmetrie.

Es ist ersichtlich, dass Messung und Simulation sehr gut übereinstimmen.

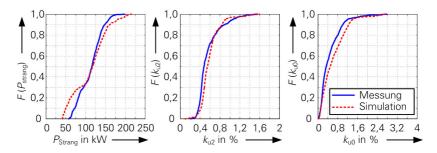


Bild II: Vergleich zwischen Simulation und Messung eines Niederspannungsnetzes mit Elektrofahrzeugen

- [1] Kraftfahrtsbundesamt, Fahrzeugzulassungen (FZ) Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern. Monatsergebnisse.
- [2] F. Möller, J. Meyer, P. Schegner, Load Model of Electric Vehicles Chargers for Load Flow and Unbalance Studies. Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ), Rakvere, 2014
- [3] A. C. Probst, M. Braun, J.Backes, S. Tenbohlen, Probabilistic analysis of voltage bands stressed by electric vehicles. 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on "Innovative Smart Grid Technologies" (ISGT Europe), Manchester, 2011



Sascha Müller, Dipl.-Ing.

Charakterisierung der Oberschwingungsemissionen von Photovoltaik-Wechselrichtern

Innerhalb der letzten Jahre erfolgte in Deutschland ein starker Anstieg der Zahl der Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) im Niederspannungsnetz. Angeschlossen werden diese über einen Wechselrichter, der je nach Topologie und Regelung ein bestimmtes Oberschwingungsspektrum erzeugt. Untersuchungen haben gezeigt, dass die harmonischen Ströme in hohem Maße durch eine bereits existierende Spannungsverzerrung am Anschlusspunkt beeinflusst werden können. Für eine Modellierung im Hinblick auf spätere Netzsimulationen ist es somit erforderlich, die Höhe dieser Abhängigkeit zu bewerten. Dazu wurde ein System von Indizes entwickelt, welches Höhe und Linearität der Abhängigkeit für verschiedene Harmonische auf Basis von Labormessungen für einen Wechselrichter quantifiziert.

Die für eine umfassende Charakterisierung nötigen Messungen werden mittels eines Netzsimulators durchgeführt, der die Vorgabe einer nahezu beliebigen Spannungsform ermöglicht. Der Betrieb der Wechselrichter erfolgt durch einen PV-Simulator, der die Kennlinie einer vorgebbaren PV-Installation nachbildet. Beide Simulatoren werden über einen Computer angesteuert, sodass ein automatisierter Messablauf realisiert werden kann. Die Grundlage für die Entwicklung des Modells bildet die Untersuchung des Einflusses einzelner, der Grundschwingung überlagerter Spannungsharmonischer auf die Stromharmonischen gleicher und verschiedener Ordnung. Jede Spannungsharmonische wird während der Messung jeweils in Betrag und Phasenwinkel variiert und die entsprechende Reaktion der Stromharmonischen ausgewertet. Bild I zeigt beispielhaft die Variation der 3. Spannungsharmonischen und die resultierende 3. und 5. Stromharmonische für einen Wechselrichter.

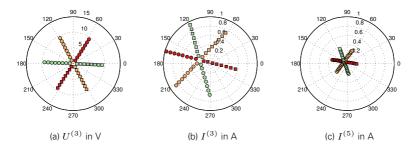


Bild I: Variation der 3. Spannungsharmonischen

Wie an den Bilder zu erkennen ist, gibt es neben einer Abhängigkeit zwischen Spannungs- und Stromharmonischer gleicher Ordnung auch eine Abhängigkeit zwischen Harmonischer unterschiedlicher Ordnung. Zur Quantifizierung dieser Abhängigkeiten werden sogenannte Sensitivitätsindizes eingeführt. Unterschieden wird dabei zwischen einem Auto-Sensitivitätsindex (asi) und einem Cross-Sensitivitätsindex (csi) [1]. Für die Berechnung dieser Indizes werden zunächst die Differenzen zwischen Maximal- und Minimalwert der einzelnen Zweige der in Bild I dargestellten Variation für Strom und Spannung bestimmt. Anschließend erfolgt die Bestimmung des Quotienten aus Stromund Spannungsdifferenz und eine Mittelung über alle Zweige. Die Ordnungen der Harmonischen werden hier mit a bzw. b bezeichnet.

$$asi^{(a)} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} \left| \frac{\underline{I}_{i \max}^{(a)} - \underline{I}_{i \min}^{(a)}}{\underline{U}_{i \max}^{(a)} - \underline{U}_{i \min}^{(a)}} \right| \cdot 1000 \tag{1}$$

$$csi^{(ab)} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} \left| \frac{\underline{I}_{i \max}^{(b)} - \underline{I}_{i \min}^{(b)}}{\underline{U}_{i \max}^{(a)} - \underline{U}_{i \min}^{(a)}} \right| \cdot 1000$$
 (2)

Die Messungen haben gezeigt, dass die drei im Labor zur Verfügung stehenden Wechselrichter sehr unterschiedlich auf eine bestehende Verzerrung der Netzspannung reagieren. In Bild II sind ihre Sensitivitätsindizes als Intensitätsplots grafisch dargestellt. Es ist zu erkennen, dass neben der Diagonalen vor allem deren unmittelbar benachbarten Felder hohe Werte annehmen. Im Modell sind somit auch die Abhängigkeiten zwischen Spannungs- und Stromharmonischer benachbarter Ordnung zu berücksichtigen, wenn ein bestimmter Schwellwert für die Sensitivitätsindizes überschritten wird. Bei Wechselrichter C ist dies teilweise auch für weiter von der Diagonale entferntere Elemente erforderlich.

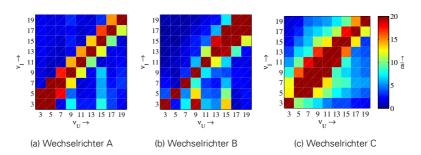


Bild II: Sensitivitätsindizes der Wechselrichter

[1] S. Müller, J. Meyer, P. Schegner, *Characterization of Small Photovoltaic Inverters for Harmonic Modeling*. ICHQP, Bukarest, 2014.



Stefan Schöttke, Dipl.-Ing. Höherfrequente Emission von Elektrofahrzeugen

Um eine höhere Effizienz zu erreichen und um die normativen Grenzwerte für Oberschwingungen einzuhalten, werden in den Ladegleichrichtern der meisten Elektrofahrzeuge netzseitig Schaltungen mit aktiver Leistungsfaktorkorrektur bzw. getaktetem Gleichrichter eingesetzt, die mit einer Schaltfrequenz im Bereich einiger Kilohertz arbeiten. Bei ungenügender Filterung verursacht dies messbare Emissionen im Frequenzbereich zwischen 2 kHz und 150 kHz, welcher bisher nur ungenügend durch Normen abgedeckt ist. Um bei der zukünftig zu erwartenden Zunahme von Elektrofahrzeugen im öffentlichen Niederspannungsnetz unzulässige Beeinflussungen der Fahrzeuge untereinander und anderer Kundenanlagen zu vermeiden [1], sind detaillierte Untersuchungen der höherfrequenten Emission der Fahrzeuge notwendig.

Dafür wurden die Momentanwertverläufe von Strom und Spannung des Ladevorgangs von 22 verschiedenen Elektrofahrzeugtypen messtechnisch unter Labor- bzw. Netzbedingungen erfasst (9 Fahrzeuge im Labor, 6 Fahrzeuge im Netz, 7 Fahrzeuge in Netz und Labor). Die Messdaten wurden nach dem Verfahren nach EN 61000-4-7, Anhang B verarbeitet [2], welches im betrachteten Frequenzbereich 200 Hz-Bänder liefert. Die systematische Analyse der Messdaten zeigte, dass die Ladegleichrichter der meisten Fahrzeuge während des Ladevorgangs ihren Arbeitspunkt verändern bzw. die Ladung teilweise auch pausiert. Sofern höherfrequente Emissionen messtechnisch nachweisbar waren, traten die höchsten Emssionspegel bei allen Fahrzeugen während der Ladung mit höchster Leistung auf. Nicht alle Fahrzeuge weisen während der Ladung eine konstante Schaltfrequenz auf. Ferner variiert zwischen den Fahrzeugen auch die Bandbreite der höherfrequenten Emission bei Schaltfrequenz. Für einige Fahrzeuge war keine höherfrequente Emission nachweisbar. Aus den Ergebnissen ergibt sich das Klassifizierungsschema nach Tabelle I für das höherfrequente Verhalten der Fahrzeuge.

Tabelle I: Klassifizierung der Schaltfrequenz der untersuchten Fahrzeuge

keine Emission	Schaltfrequenz			Bandbreite	
	konstant	variable	variable	schmal	breit
		(diskret)	(kontinuierlich)		

Bild I zeigt als Beispiel die höherfrequenten Spektren während des Ladevorgangs von zwei verschiedenen Fahrzeugen. Das Fahrzeug in Bild la lädt mit kontinuierlich variabler Schaltfrequenz bei schmalbandiger Emission, das Fahrzeug in Bild Ib schaltet deutlich sichtbar seinen Arbeitspunkt um und wechselt

dabei seine Schaltfrequenz. Die Emission ist während der gesamten Ladung breitbandig.

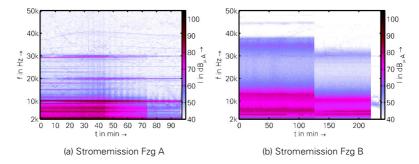


Bild I: Ladeverhalten von zwei verschiedenen Elektrofahrzeugen

Bild II zeigt Emissionspegel und Schaltfrequenzen für vier der Fahrzeuge, die im Labor und unter Netzbedingungen gemessen wurden. Die Grafik zeigt sowohl die Unterschiede in der Schaltfrequenz, als auch im Emissionspegel. Fahrzeug C generiert im Labor Emissionspegel von bis zu  $120\,\text{dB}_{\mu\text{A}},$  was einem Wert von 1A entspricht. Diese vergleichsweise hohe Emission unterstreicht die Notwendigkeit, den höherfrequenten Bereich zwischen 2 kHz und 150 kHz weiter detailliert zu untersuchen.

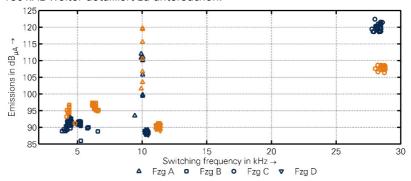


Bild II: Vergleich der Emissionspegel bei Schaltfrequenz verschiedener Fahrzeuge für Netz- (orange) und Labormessung (blau)

- [1] Taskforce EMI, Study report on electromagnetic interference between electrical equipment/systems in the frequency range below 150 kHz, 2. Auflage, CENELEC SC 205A Mains communicating systems, 2013
- [2] DIN EN 61000-4-7:2009-12, Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) Teil 4-7: Prüfund Messverfahren - Allgemeiner Leitfaden für Verfahren und Geräte zur Messung von Oberschwingungen und Zwischenharmonischen in Stromversorgungsnetzen und angeschlossenen Geräten, DKE, 2009



Robert Stiegler, Dipl.-Ing.

# Messgenauigkeit bei der Strommessung mit Rogowskispulen

Im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte ist die genaue Messung verzerrter Ströme im Niederspannungsnetz (z. B. eines Haushaltes) oder an einzelnen Geräten (z. B. Ladegleichrichter von Elektrofahrzeugen) notwendig. Für die Strommessung bei diesen Untersuchungen werden Rogowskispulen (im Folgenden kurz als Spulen bezeichnet) eingesetzt, da mit ihnen das berührungslose Messen von Strömen ohne das Auftrennen des Stromkreises möglich ist.

Die Messgenauigkeit wird von Herstellern nur für die Idealposition und in Verbindung mit einer -3 dB Grenzfrequenz angegeben. Untersuchungen haben ergeben, dass die Messgenauigkeit von einer Vielzahl verschiedener Faktoren beeinflusst werden kann: die Lage des Leiters (Position, Winkel), die Nähe benachbarter Leiter, die zu messende Frequenz, die Signaldynamik des Primärstromes und die Serienstreuung der Spulen. Deshalb wurde die Messgenauigkeit dreier am Institut eingesetzter Spulen detailliert hinsichtlich der genannten Einflussfaktoren untersucht. Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse für Lageabhängigkeit und Frequenzabhängigkeit der Messgenauigkeit kurz vorgestellt.

In Bild I ist die frequenzabhängige Übertragungsgenauigkeit der drei Spulen bis 150 kHz in Idealposition dargestellt. Der Frequenzgang der Spulen ist sehr unterschiedlich. Während Spule 2 einen relativen Fehler von 1 % bis 150 kHz nicht überschreitet, erreichen Spule 1 und Spule 3 diesen Fehler bereits bei 30 kHz bzw. 8 kHz. Das frequenzabhängige Übertragungsverhalten wird durch den Integrator der Spule bestimmt, welcher entweder extern oder direkt im Messgerät realisiert sein kann.

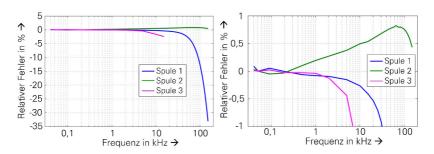


Bild I: Frequenzabhängiger Fehler der Spulen in Mittenposition

Die Beeinflussung der Messgenauigkeit durch die Leiterposition ist im Funktionsprinzip der Rogowskispule begründet. Dies besteht darin, dass der magnetische Fluss um den zu messenden Leiter herum aufintegriert wird. Bei den verwendeten Spulen handelt es sich jedoch um flexible Spulen mit einem Spulenschloss. Im Spulenschloss kann die Wicklung konstruktiv nicht lückenlos fortgesetzt werden, sodass der Fluss in der Lücke nicht für die Messung genutzt werden kann. Die Lücke im Spulenschloss wurde für die untersuchten Spulen mit Röntgenbildern vermessen (Bild II). Mit der Lückenbreite kann der Messfehler für beliebige Leiterpositionen innerhalb der Spule durch Berechnung der Gegeninduktivität bestimmt werden. In Bild III ist der berechnete Messfehler für eine Spule dargestellt. Hier zeigt sich, dass Leiterpositionen nahe dem Spulenschloss sehr große negative Messfehler verursachen. Befindet sich der Leiter auf der entgegengesetzten Seite in der Spule resultiert dies in einem vergleichsweise kleinen positiven Messfehler. Die beiden anderen Spulen verhalten sich vergleichbar. Die Berechnungsergebnisse wurden mit Messungen bei verschiedenen Leiterpositionen verifiziert. Die Abweichungen zwischen Modell und Messung betragen weniger als 0,1 %. Aufgrund des sehr großen Messfehlers bei Positionierung des Leiters in der Nähe des Spulenschlosses sollte der Leiter praktisch immer so weit wie möglich vom Spulenschloss entfernt liegen.



Bild II: Schloss einer Rogowskispule

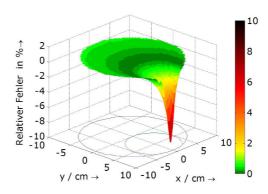


Bild III: Simulation, Spule 2

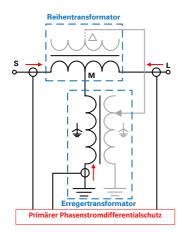
## Projekte zum Forschungsschwerpunkt "Schutz- und Leittechnik"

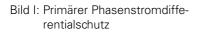


Jörg Meyer, Dr.-Ing.
Schutz eines Phasenschiebertransformators

Durch den Einsatz von Phasenschiebertransformatoren (PST) soll der Lastfluss im Elektroenergiesystem beeinflusst werden. Beim untersuchten Phasenschiebertransformator handelte es sich um einen Querregeltransformator. Verschiedene Schutzkriterien sollten hinsichtlich der Einsetzbarkeit bei diesem Transformator untersucht und bewertet werden.

Als *Hauptschutz* sollten beim Querregeltransformator zwei Phasenstrom-differentialschutzsysteme eingesetzt werden, um innere Fehler schnell und selektiv abschalten zu können. Der *primäre Phasenstromdifferentialschutz* erkennt Fehler in den *Primärwicklungen* des Phasenschiebers und der *sekundäre Phasenstromdifferentialschutz* Fehler in den *Sekundärwicklungen*. Die Trennung ist notwendig, da es sich um galvanisch getrennte Stromkreise innerhalb des Phasenschiebers handelt.





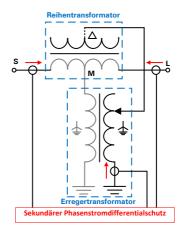


Bild II: Sekundärer Phasenstromdifferentialschutz

Die Messung der für den sekundären Phasenstromdifferentialschutz benötigten Ströme erfolgt am untersuchten PST auf der *Primärseite* und wird über eine Schaltgruppenanpasssung umgerechnet. Dies hat zur Folge, dass Feh-

ler im Schutzbereich des primären Phasenstromdifferentialschutzes teilweise auch durch den sekundären Phasenstromdifferentialschutz erkannt werden.

Als Reserveschutzkonzept wurde die Anwendbarkeit von Distanzschutzgeräten untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass

- die vom Distanzschutz berechneten Fehlerimpedanzen stark verfälscht werden und
- die Impedanzverfälschung abhängig von der Netzvorimpedanz ist.

Beide Aussagen lassen sich an folgender Abbildung verdeutlichen:

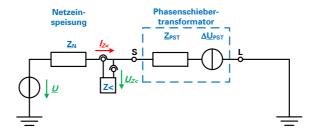


Bild III: Einpoliges Ersatzschaltbild für impedanzlosen Fehler nach dem Phasenschiebertransformator

Die vom Distanzschutz berechnete Impedanz ergibt sich über:

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}_{Z<}}{\underline{I}_{Z<}} = \underline{Z}_{PST} + \frac{\underline{\Delta}\underline{U}_{PST}}{\underline{I}_{Z<}} = \underline{Z}_{PST} + \underline{\Delta}\underline{Z}$$
 (1)

Beim einpoligen Fehler wird die vom Querregeltransformator eingeprägte Spannung von den beiden nicht fehlerbetroffenen Phasen abgegriffen und ist deshalb weitestgehend unabhängig vom Fehler. Diese Spannung wird direkt in die vom Distanzschutz eingemessene Fehlerschleife eingeprägt. Die vom Distanzschutz berechnete Impedanz wird entsprechend Gleichung 1 verfälscht. Es ergibt sich damit eine steigende Impedanzverfälschung mit abnehmendem Kurzschlussstrom und somit die genannte Abhängigkeit von der Netzimpedanz.

Darüber hinaus wurden Verfahren der *Erdfehlererkennung* und deren Anwendung für den Schutz des Phasenschiebertransformators untersucht.



Sebastian Palm, Dipl.-Ing.

Wirkung der frequenzabhängigen Wirkleistungsreduktion auf die Stabilität von Inselnetzen

Um einem Ansteigen der Frequenz im Verbundbetrieb des elektrischen Netzes entgegen wirken zu können, müssen alle dezentralen Erzeugungsanlagen (DEA) ihre Wirkleistungsabgabe reduzieren können [1], [2]. Ab 50,2 Hz reduziert sich nach Gl. 1 die abgegebene Leistung um 0,4  $P_{\rm M}$ /Hz innerhalb der Grenzen 50,2 Hz  $\leq f \leq$  51,5 Hz. In Abhängigkeit von der momentan verfügbaren Leistung  $P_{\rm M}$  (wobei der Index M auf die zum Zeitpunkt der Frequenzüberschreitung verfügbare momentane Wirkleistung hinweist) und der Frequenz f kann somit die notwendige Leistungsreduktion  $\Delta P$  berechnet werden. Erst bei erneutem Absinken der Frequenz auf f < 50,05 Hz ist eine erneute Anhebung der Leistungsabgabe über  $P_{\rm M}$  zulässig.

$$\Delta P = 20 \cdot P_{\rm M} \cdot \frac{50, 2 - f/{\rm Hz}}{50}$$
 (1)

Die frequenzabhängige Wirkleistungsreduktion soll im Betrieb mit dem Verbundnetz das Wirkleitungsgleichgewicht im Netz unterstüzen, da eine auftretende Überfrequenz ein Hinweis auf einen Überschuss an erzeugter Wirkleistung ist. Statt einem plötzlichen Abschalten der DEA, was bei einer hohen Durchdringung des Netzes zu Stabilitätsproblemen führen kann, wird die Leistung dabei langsam reduziert.

Mit dem Modellnetz in Bild I wurde untersucht, welchen Einfluss die P(f)-Vorgabe auf die Stabilität von unbeabsichtigten Inselnetzen hat.

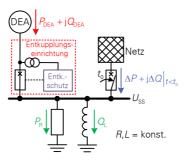


Bild I: Vereinfachtes Modellnetz zur Untersuchung von Inselnetzen

Zum Zeitpunkt  $t_0=0\,\mathrm{s}$  wird das vorgelagerte Netz getrennt und die Wirkund Blindleistungen können sich nur noch zwischen DEA und der Last ausgleichen. Der Entkupplungsschutz der DEA überwacht dabei  $U_{\mathrm{SS}}$  und f und

entkuppelt die DEA beim Über- oder Unterschreiten der Schutzgrenzen automatisch vom Rest des Netzes. Das betrachtete Inselnetz weist zunächst einen Überschuss an Wirkleistung auf ( $P_R=0,8\cdot P_{\rm DEA}$ ) und die Induktivität benötigt mehr Blindleistung als die DEA zum Zeitpunkt  $t_0$  liefert ( $Q_L=1,1\cdot Q_{\rm DEA}$ ). Die Ergebnisse werden in Bild II dargestellt.

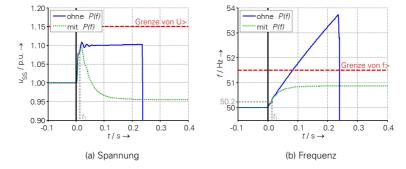


Bild II: Vorgänge nach Abtrennen des vorgelagerten Netzes bei t = 0 s

Ohne P(f)-Vorgabe steigt  $U_{\rm SS}$  im Inselnetz nach GI. 2 sehr schnell an, sodass die ohmsche Last die überschüssige Leistung aufnehmen kann und die Wirkleistungsbilanz ausgeglichen ist. Durch die höhere Spannung steigt der Blindleistungsbedarf der Induktivität an. Da der Beitrag  $Q_{\rm DEA}$  der DEA konstant gehalten wird, kann die Blindleistungsbilanz nur über einen Anstieg der Frequenz und damit einer Verringerung von  $Q_L$  nach GI. 3 ausgeglichen werden. Dadurch steigt die Frequenz über die Grenze des Entkupplungsschutzes und die unbeabsichtigte Insel wird nach ungefähr 150 ms abgeschaltet.

$$P_R = \frac{U_{\rm SS}^2}{R} \tag{2}$$

$$Q_L = \frac{{U_{\rm SS}}^2}{\omega L} \tag{3}$$

Für den Fall der aktivierten P(f)-Vorgabe ändert sich das Verhalten sobald f nach der Zeit  $t_1$  größer als 50,2 Hz ist. Ab dieser Frequenz wird die eingespeiste Wirkleistung reduziert, wodurch  $U_{\rm SS}$  nach Gl. 2 wieder absinkt. Dadurch sinkt auch der Blindleistungsbedarf der Induktivität nach Gl. 3 und die Frequenz muss nur in geringerem Maße ansteigen. Dieser Vorgang führt dazu, dass sich ein stabiles Inselnetz einstellen kann, da die Frequenzgrenze des Entkupplungsschutzes (siehe Bild IIb) nicht überschritten wird.

- [1] VDE, VDE-AR-N 4105 Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz. VDE Verlag GmbH, Berlin 2011.
- [2] BDEW, *Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz*. Bundesverband der Energieund Wasserwirtschaft, Berlin 2008.



Karsten Wenzlaff, M.Sc.

### Konzeption eines Störlichtbogenversuchsstandes

Mit experimentellen Untersuchungen an parallelen, stromstarken Niederspannungs-Störlichtbögen können systembedingte Einflussfaktoren auf Spannungs- und Stromzeitverläufe analysiert werden. Am Versuchsstand soll es zukünftig möglich sein, Parameter, die charakteristische Eigenschaften eines Niederspannungs-Störlichtbogens signifikant beeinflussen, sinnvoll zu variieren. Die Strom- und Spannungsverläufe sollen dabei aufgezeichnet werden.

#### Einflussfaktoren

Einflussfaktoren auf Störlichtbögen können in elektrische, konstruktive und atmosphärische Einflussfaktoren unterteilt werden. Bild I zeigt eine gruppierte Zuordnung; die dabei farblich markierten Einflussfaktoren beeinflussen die resultierenden Strom- und Spannungsverläufe von Störlichtbögen wesentlich und sollen daher zukünftig am Versuchsstand experimentell untersucht werden

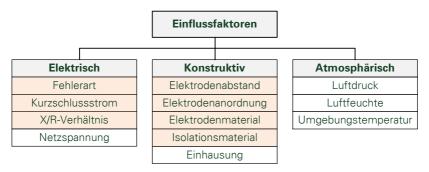


Bild I: Übersicht der systembedingten Einflussfaktoren auf Störlichtbögen

Zusätzlich zu den variierenden elektrischen und konstruktiven Einflussfaktoren, die es zu untersuchen gilt, ist ein geeigneter Zündmechanismus für den Störlichtbogen zu wählen.

Für die Zündung synthetisch erzeugter Störlichtbögen hat sich in der Niederspannung der Einsatz von einem Zünddraht als sehr effektiv erwiesen. Die Zündung des Lichtbogens erfolgt mit Verdampfen des Zünddrahtes. Durch den Metalldampf werden zusätzliche Ladungsträger freigesetzt, die eine Lichtbogenzündung positiv beeinflussen. Hierbei ist jedoch die Wahl eines geeigneten Drahtquerschnittes, in Abhängigkeit des zu erwartenden Lichtbo-

genstromes, zu beachten. Ein zu groß gewählter Drahtquerschnitt kann dazu führen, dass es nicht zu einem Verdampfen des Zünddrahtes kommt und der Zünddraht lediglich einen direkten Kurzschluss für das Netz darstellt. Ist der Querschnitt des Zünddrahtes dagegen zu gering gewählt, würde dieser schnell verdampfen, jedoch die Menge an zusätzlich frei gesetzten Ladungsträgern nicht ausreichen, um einen Störlichtbogen sicher zu zünden. Die durch das verdampfende Metall frei gesetzten Ladungsträger beeinflussen zusätzlich die Strom- und Spannungsverläufe, so dass dadurch ebenfalls ein weiterer Einflussfaktor entsteht, den es zu untersuchen gilt.

#### Aufbau des Versuchsstandes

Bild II zeigt den technologischen Aufbau des Versuchsstandes, mit dem die Untersuchung signifikanter Einflussfaktoren möglich ist. Für die Fehlerart kann dabei unterschieden werden in 1-, 2- und 3-poligen Störlichtbogen mit und ohne Erdberührung.

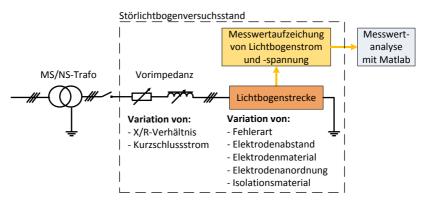


Bild II: Prinzipskizze zum Aufbau eines Störlichtbogenversuchsstandes

Für die Erfassung des Lichtbogenstroms, der im einstelligen kA-Bereich zu erwarten ist, wird ein Messcomputer mit geeigneter Messtechnik eingesetzt. Diese sollte auch im hohen Frequenzbereich ein lineares Übertragungsverhalten besitzen. Somit besteht bei der Messwertanalyse die Möglichkeit, die aufgezeichneten Daten ebenfalls im Frequenzbereich detailliert auszuwerten. Die Lichtbogenspannung soll direkt gemessen und mit dem Messcomputer aufgezeichnet werden. Dabei werden sowohl die Leiter-Leiter- als auch die Leiter-Erde-Spannungen gemessen. Mit den aufgezeichneten Strom- und Spannungsverläufen erfolgt die Untersuchung von Abhängigkeiten hinsichtlich der variierten Einflussfaktoren auf signifikanten Eigenschaften der Strom- und Spannungsverläufe von Störlichtbögen im Zeit- und Frequenzbereich.

## Projekte zum Forschungsschwerpunkt "Smart Grid"



Tobias Heß, Dipl.-Ing.

Anwendungsbeispiel – Energiehandel im Regionalen Virtuellen Kraftwerk

Das Regionale Virtuelle Kraftwerk (RVK) ist die systemgerechte Einbindung von Erzeuger- und Verbrauchereinheiten insbesondre  $\mu$ KWK-Anlagen in des elektrische Netz. Über einen hierarchischen Ansatz und effiziente Einsatzplanungs- und Steuerungsalgorithmen kann eine große Anzahl von Anlagen unter Berücksichtigung von Netzengpässen betrieben werden [1,2].

Die Einsatzplanungsalgorithmen liefern eine zuverlässige Prognose der möglichen Energieproduktion des RVKs. Dies ermöglicht den RVK-Betreiber die erzeugte Energie an den Märkten anzubieten. Die Betriebsalgorithmen stellen zudem sicher, dass die gehandelte Energie durch das RVK erbracht wird.

In diesem Beitrag wird der optimierte Betrieb des RVKs unter Berücksichtigung des Day-Ahead-Preises simuliert. Durch eine lineare Optimierung mit den Randbedingungen der Einsatzplanungskennwerte wird ein Fahrplan für die  $\mu$ KWK-Anlagen des RVK berechnet, der den Erlös aus dem Energiehandel auf Basis des Day-Ahead-Preises maximiert. Als Eingangsdaten für den Day-Ahead-Preis werden die historischen Daten des Day-Ahead-Marktes der EPEX Spot von 2012 verwendet (siehe Abbildung I)

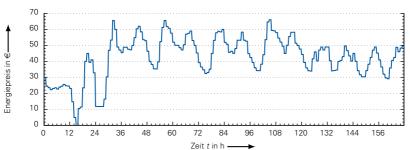


Bild I: EPEX Spot Stundenpreise vom 1.4.2012 bis 7.4.2012

Basierend auf diesem Preis ergibt sich die in Abbildung II dargestellte erzeugte Leistung. Zum Vergleich sind in der Abbildung die erzeugte Leistung der µKWK-Anlagen bei einem wärmegeführten Betrieb dargestellt. Die Verläufe zeigen, dass die erzeugte Leistung des RVKs durch die gezielte Einsatzplanung gut an den Energiepreis angepasst werden kann. Zu Zeiten hoher Energiepreise speist das RVK trotz geringer thermischer Last mit maximaler Leistung ein und zu Zeiten niedriger Energiepreise wird die Leistung des RVKs teilweise auf 0 kW reduziert. Im wärmegeführten Betrieb des RVKs ist

die erbrachte Leistung nur von den thermischen Bedarfen und den Speicherzuständen abhängig.

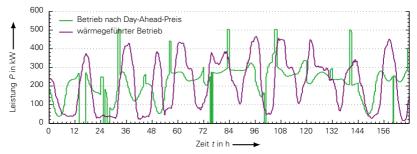


Bild II: Erzeugte Leistung des RVKs bei erlösoptimierten und bei wärmegeführten Betrieb der μΚWK-Anlagen

Um den Betrieb zu bewerten, werden die erzielten Erlöse des RVK-Betriebs und die theoretischen Erlöse des wärmegeführten Betriebs, unter der Annahme, dass die erzeugte Energie ebenfalls zum Day-Ahead-Preis verkauft werden kann, in einer Simulation über ein Jahr miteinander verglichen. Die relativen Unterschiede in den Erlösen ist ein Maß wie effektiv der RVK-Betrieb die Energieerzeugung an den Day-Ahead-Preis anpassen kann. Abbildung III stellt die Ergebnisse für jeden Monat dar.

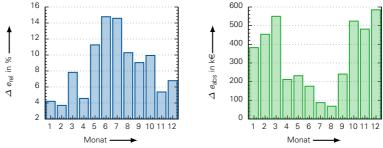


Bild III: Absolute und relative Erlösdifferenz je Monat

Mit dem erlösoptimierten RVK-Betrieb lassen sich gegenüber des wärmegeführten Betriebs im Jahresmittel um 6 % mehr Einnahmen erzielen. Je geringer der thermische Energiebedarf ist und damit je größer die mögliche zeitliche Verschiebung der Erzeugung [2], desto höher ist auch die relative Erhöhung des Erlöses. So kann im Juni und Juli der Erlös um fast 15 % gesteigert werden. Aufgrund des hohen Wärmeenergiebedarfs im Winter und in der Übergangszeit ist die absolute Erhöhung des Erlöses in diesen Zeiten größer.

- [1] T. Heß, P. Schegner, J. Seifert, J. Werner, *Regionale Virtuelle Kraftwerke Aufbau und Chancen*. In: Kraftwerktechnisches Kolloquium 2012. Dresden, 2012
- [2] Hess, T., Werner, J., Schegner, P. Storage potential of the Local Virtual Power Plant based on μCHP-devices. In 2014 IEEE PES T&D Conference & Exposition. 2014



Jens Werner, Dipl.-Ing.

Potentialanalyse für ein Eigenversorgungskonzept zur Deckung der im Gebäude anfallenden elektrischen und thermischen Bedarfe

Der durch Marktanreizprogramme getriebene Ausbau der erneuerbaren Energien (EE) führte im Jahr 2013 zu einem EE-Anteil von 23,4 % an der elektrischen Energieerzeugung. Im Rahmen der Energiewende oftmals unbeachtet bleibt jedoch, dass 83 % [1] des Endenergieverbrauchs im Haushalt für die Wärmeversorgung, d. h. Raumwärme (RW) und Warmwasser (WW) benötigt werden, ein Bereich in dem erneuerbare Energien bisher eine untergeordnete Rolle spielen. Die Einbindung von z. B. Wärmepumpen ermöglicht es, den EE-Anteil im Haushalt weiter zu erhöhen. Perspektivisch ist aufgrund stark sinkender Stromgestehungskosten für PV-Anlagen, aktuell zwischen 10 ct/kWh und 14 ct/kWh für Aufdachanlagen [2], insbesondere die Eigenversorgung eines Gebäudes wirtschaftlich interessant.

Die nachfolgenden Ergebnisse zeigen die Potentiale zur Elektro- und Wärmeeigenversorgung durch ein intelligentes Erzeugungsmanagement (iEMA). Durch das iEMA werden zwei wesentliche Ziele verfolgt. Zum einen soll die durch erneuerbare Energien (PV) bereitgestellte Wärme zur Erfüllung des RW- und WW-Bedarfs maximiert werden. Zum anderen ist durch das iEMA ein netzdienliches Verhalten zu realisieren, d. h. es soll ein Beitrag zur Spannungshaltung und zur Reduktion der Strombelastbarkeit in den elektrischen Netzen geleistet werden. Letztgenanntes Ziel wird erreicht, indem durch das iEMA hohe PV-Einspeisespitzen genutzt werden. Dies gewährleistet die Reduktion der PV-Jahresspitzeneinspeisung ins öffentliche Energieversorgungsnetz. Zusätzlich ist für beide Ziele der resourcenschonende Einsatz der EE-Erzeugung maßgebend, d. h. die Wärmeerzeugung muss möglichst zeitnah zum Verbrauch erfolgen.

Die Versorgung eines Gebäudes wird am Beispiel eines Einfamilienhauses mit Wärmepumpe (WP) aufgezeigt (vgl. Bild I). Auf Basis eines abstrahierten Modells werden energetische Betrachtungen mit einer zeitlichen Auflösung von 15 min durchgeführt. Die Grundlage hierfür sind realitätsnahe Lastprofile für die im Haushalt anfallenden thermischen und elektrischen Bedarfe sowie für die Erzeugung durch die PV-Anlage. Besondere Relevanz besitzen die thermischen Profile. Diese stammen aus einer 3D-Gebäudesimulation, bei der anhand eines Typreferenzjahres, eines vorgegebenen Energiestandards sowie eines festgelegten hydraulischen Heizungskreises der thermische Bedarf ermittelt wird. Durch Variation der PV-Anlagenleistung sowie der Speicherauslegung lässt sich somit das Potential bestimmen.

Tabelle I zeigt Ergebnisse der Untersuchung. Durch gezielte Nutzung der durch die PV eingespeisten Energie kann der Autarkiergrad eines Haushalts deutlich erhöht werden. Selbiges gilt für den EE-Anteil in der Gebäudever-

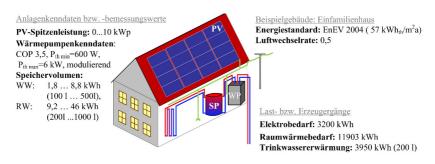


Bild I: Gebäudemodell mit Eingangskenndaten

sorgung, welche unter Berücksichtigung eines EE-Anteils im Strommix von 23.4 % für den Netzbezug berechnet wurde. Bereits für eine moderate PV-Einspeisung von 3500 kWh ist ein EE-Anteil von 46,1 % erreichbar. Das Potential ist insbesondere in der Übergangszeit (März - Mai und September - Oktober) gegeben, da sowohl nennenswerter RW-Bedarf als auch eine signifikante Einspeisung durch PV in diesem Zeitraum gegeben ist. Ein weiterer nicht zu verachtender Aspekt stellt die Reduktion der PV-Jahresspitzenleistung dar. Hierfür kann auch bei sehr hohen PV-Anlagenleistungen eine deutliche Reduktion von 30,6 % erreicht werden. Maßgebend hierfür ist der WW-Bedarf in den Sommermonaten, da in dieser Zeit die maximale PV-Einspeisung auftritt. Die Reduktion der PV-Jahresspitzenleistung hat zwei wesentliche Vorteile für die Gewährleistung eines sicheren und zuverlässigen Netzbetriebs. Zum einen führt dies zu einer verbesserten Spannungshaltung in den Niederspannungsnetzen. Zum anderen kann durch das iEMA die Fluktuation von EE bereits an der Bilanzgrenze Gebäude deutlich reduziert und somit auch die Einsatzplanung für konventionelle Kraftwerke erleichtert werden. Die Nutzung von Strom im Wärmemarkt stellt somit einen wesentlichen Baustein für die Integration erneuerbarer Energien sowie zum Erreichen der von der Bundesregierung gesteckten Ziele zur CO<sub>2</sub>-Reduktion dar.

Tabelle I: Ergebnisse der Potentialanalyse

PV-Einspeisung	1000 kWh	3500 kWh	6000 kWh
Autarkiegrad für Gebäudeversorgung	12,6 %	29,4 %	35,7 %
EE-Anteil für Gebäudeversorgung	33,3 %	46,1 %	51 %
Reduktion der PV-Jahresspitzeneinspeisung	75 %	39 %	30,6 %

- [1] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., Auswertungstabellen zur Energiebilanz 1990-2012, 2013
- [2] Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Stromgestehungskosten erneuerbare Energien, November 2013

#### 3.1.2 Publikationen

## Vorträge

Bauer, H.:

Geschichte des Überspannungsschutzes. 2. Symposium Blitzüberspannungen und Überspannungsschutz,

Dresden, 11.03.2014

Blanco, A. M.:

Tutorial: Harmonic aspects of new electricity production and consumption. Equipment Aspects. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14),

Cordoba, Spanien, 07.04.2014

Dickert, J.:

German Energiewende - The story behind the Energy Transition. IEEE, Philadelphia, USA, 01.08.2014

Dickert. J:

Beyond Electricity – Can Germany be Fully Renewable?. Conference of Electric Power Supply Industry CEPSI 2014,

Jeju Island, Korea, 26.-30.10.2014

Möller, F.:

ElmoNetQ - Auswirkung einer zunehmenden Durchdringung von Elektrofahrzeugen auf die Elektroenergiequalität in öffentlichen Niederspannungsnetzen. 5. Sächisch-Böhmische Innovationsbörse,

Freital, 23.09.2014

Palm, S.; Schegner, P.:

Grundlagen der Detektierbarkeit und Detektionsverfahren von Inselnetzen. Tutorial Schutz- und Leittechnik 2014,

Düsseldorf, 05.-06.02.2014

Palm, S.; Schegner, P.:

Impulsvortrag Kurzschlüsse in Inselnetzen. Tutorial Schutz- und Leittechnik 2014,

Düsseldorf, 05.-06.02.2014

Schegner, P.:

Zum 85. Geburtstag – Gedenken an Prof. Dr.-Ing. habil. Hans Pundt. Gedankkolloquium zum 85. Geburtstag von Prof. Pundt,

Dresden, 29.04.2014

Schegner, P.; Gampe U.; Beckmann M.:

Energiespeicher-Forschung an der TU Dresden – das Cluster Combined Storage Systems Integration (CSSI). Innovationstag Speicher,

Dresden, 11.09.2014

Werner, J.; Hess, T.:

Use of thermal storages in Local Virtual Power Plants. Internal Summer School.

TU Dresden, Dresden, 26.09.2014

#### Poster

Meyer, J.; Philippot, L.:

Optimierungsmöglichkeiten der automatischen Wiedereinschaltung für kritische Höchstspannungsleitungen. Tutorial Schutz- und Leittechnik 2014, Düsseldorf, 05.-06.02.2014

Meyer, J.; Schegner, P.; Istvan, E. Neumann, T.:

Gegensystemstromregelung von Windturbinen und deren Einfluss auf den Netzschutz. Tutorial Schutz- und Leittechnik 2014,

Düsseldorf, 05.-06.02.2014

Schegner, P.; Fickert, L.; Druml, G.; Rauniung, C.:

Neue Erdschlussortungsverfahren durch die Schnelle Pulsortung – Ergebnisse von Feldversuchen. Tutorial Schutz- und Leittechnik 2014,

Düsseldorf, 05.-06.02.2014

Schmidt, U.; Yu Wei; Schegner, P; Druml G.:

Vergleich von Simulation und Messung von Oberschwingungen im Reststrom eines 20-kV-Netzes. 3. ETG-Fachtagung, Sternpunktbehandlung in Netzen bis 110 kV,

Nürnberg, 16.-17.09.2014

## Veröffentlichungen

Bartholomäus, K.:

Identifikation Erdschlussgefährdeter Netze. netzpraxis Magazin für Energieversorgung – Planung, Bau, Betrieb, Service, Frankfurt, Ew Medien und Kongresse,

Oktober 2014

Bauer, H.:

Isolationskoordination und Überspannungsschutz. Fachveranstaltung Hochspannungs-Schaltanlagen,

Essen. 05.11.2014

Blanco, A. M.; Meyer, J.; Schegner. P.:

Calculation of phase angle diversity for time-varying harmonic currents from grid measurement. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14),

Cordoba, Spanien, 08.-10.04.2014

Bollen, M.; Meyer, J.; Amaris, H.; Blanco, A. M.; Gil de Castro, A.; Desmet, J.; Klatt, M.; Kocewiak, Ł.; Rönnberg, S.; Yang, K.:

Future Work on Harmonics – Some Expert Opinions Part I – Wind and Solar Power. 16th IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP 2014),

Bukarest, Rumänien, 25.-28.05.2014

Cabadag, R.; Schmidt, U. Schegner, P.:

Reactive Power Capability of a Sub-Transmission Grid Using Real-Time Embedded Particle Swarm Optimization. The 5th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT),

Istanbul, Türkei, 12.-15.10.2014

Collin, A. J.; Djokic, S. Z.; Cresswell, C. E.; Blanco, A. M.; Meyer, J.:

Cancellation of Harmonics between Groups of Modern Compact Fluorescent Lamps. IEEE SPEEDAM,

Ischia, Italien, Juni 2014

Dickert, J.; Schegner, P.:

Comparison of Design Concepts for AC Low Voltage Distribution Networks. IEE PES General Meeting,

National Harbor, USA, 27.-31.07.2014

Dickert, J.; Panitz, F.; Schegner, P.:

Lastverschiebungspotenzial von Haushaltsgeräten unter Berücksichtigung von Effizienzsteigerungen und Komfortansprüchen. Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern (NEIS Konferenz),

Hamburg, 18.-19.09.2014

Dickert, J.; During, H.; Kober, J.; Schegner, P:

Sensitivitäten von Netzausbaumaßnahmen durch den Anschluss von PV-Anlagen an das Niederspannungsnetz. VDE-Kongress,

Frankfurt (Main), 20.-21.10.2014

Lammert, G.; Hess, T.; Schmidt, M.; Schegner, P.; Braun, M.:

Dynamic Grid Support in Low Voltage Grids – Fault Ride-Through and Reactive Power/Voltage Support during Grid Disturbances. PSCC 2014,

Wroclaw, Polen, 18.8.-22.08.2014

Kilter, J.; Meyer, J.; Elphick, S.; Milanovic, J. V.:

Guidelines for Power Quality Monitoring – Results from CIGRE/CIRED JWG C4.112. 16th IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP 2014),

Bukarest, Rumänien, 25.-28.05.2014

Klatt, M.; Meyer, J.; Schegner, P.:

Comparison of measurement methods for the frequency range of 2 kHz to 150 kHz. 16th IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP).

Bukarest, Rumänien, 25.-28.05.2014

Kreutziger, M.; Schmidt, U.; Schegner, P.:

Möglichkeiten und Grenzen der Bereitstellung von Blindleistung aus 110-kV-Verteilnetzen. Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern (NEIS Konferenz),

Hamburg, 18.-19.09.2014

Meyer J. et al:

Efficient Implementation of Power Quality monitoring campaigns – Position paper of Joint WG CIGRE/CIRED C4.112. CIDEL,

Buenos Aires, Argentinien, September 2014

Meyer J.; Kilter, J.:

Case Studies for Power Quality Monitoring in Public Distribution Grids Some Results of Working Group CIGRE/CIRED C4.112. PQ Conference,

Rakvere, Estland, 11.-13.06.2014

Meyer, J.; Bollen, M.; Amaris, H.; Blanco, A. M.; Gil de Castro, A.; Desmet, J.; Klatt, M.; Kocewiak, Ł.; Rönnberg, S.; Yang, K.:

Future Work on Harmonics – Some Expert Opinions Part II – Supraharmonics, Standards and Measurements. 16th IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP 2014),

Bukarest, Rumänien, 25.-28.05.2014

Möller, F.; Meyer J.; Schegner P.:

Load Model of Electric Vehicle Chargers for Load Flow and Unbalance Studies. 2014 Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ2014),

Rakvere, Estland, 11.-13.06.2014

Möller, F.; Meyer J.; Schegner P.; Wald, C.; Isensee, S.:

Untersuchung der Netzrückwirkungen von Elektrofahrzeugen. Dresdener Kreis 2014,

Leipzig, 19.-20.03.2014

Möller, F.; Meyer J.; Schegner P.:

Einfluss von Elektrofahrzeugen auf die Elektroenergiequalität in Niederspannungsnetzen. 3. Symposium Elektromobilität,

Ostfildern, 20.05.2014

Müller, S.; Meyer, J.; Schegner, P.:

Characterization of Small Photovoltaic Inverters for Harmonic Modeling. 16th IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP 2014),

Bukarest, Rumänien, 25.-28.05.2014

Müller, S.; Möller, F.; Meyer, J.; Collin, A. J.; Djokic, S. Z.:

Characterisation of Harmonic Interactions Between Electric Vehicle Battery Chargers and PV Inverters. 16th IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP 2014),

Bukarest, Rumänien, 25.-28.05.2014

Oehmgen, P.; Seifert, J.; Meinzenbach, A.; Werner, J.:

Regionale Virtuelle Kraftwerke auf Basis der Mikro-KWK-Technologie. et -Energiewirtschaftliche Tagesfragen,

Juni 2014

Palm, S.:

Grundlagen der Detektierbarkeit und Detektionsverfahren von Inselnetzen. Dresdener Kreis 2014,

Leipzig, 19.-20.03.2014

Prasomthong, J.; Ongsakul, W.; Meyer, J.:

Optimal Placement of Vehicle-to-Grid Charging Station in Distribution System using Particle Swarm Optimization with Time Varying Acceleration Coefficient. ICUE, Pattaya City,

Thailand, März 2014

Schegner, P.; Druml, G.; Raunig, C.:

Comparison of restriking cable-earthfaults in isolated and compensated networks. 16th IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP 2014),

Bukarest, Rumänien, 25.-28.05.2014

Schegner, P.; Sperling, E.:

Dimensions of influence of RC-dividers on the measurement of power quality parameters in high-voltage transmission networks. cigre 2014,

Paris, Frankreich, 24.-29.08.2014

Schegner, P; Schmidt U.:

Sternpunktbehandlung und Erdung in Kabelnetzen. Kabelseminar,

Hannover, 14.-15.10.2014

Schmidt, U.; Schegner, P; Fickert, L; Druml G.:

Bedeutung der Löschgrenze für die Resonanz-Sternpunkterdung. 3. ETG-Fachtagung, Sternpunktbehandlung in Netzen bis 110 kV,

Nürnberg, 16.-17.09.2014

Schmidt, U.; Schegner, P:

Einfluss des Fehlerortes auf den Erdschluss-Reststrom bei Resonanz-Sternpunkterdung im 110-kV-Netz. 3. ETG-Fachtagung, Sternpunktbehandlung in Netzen bis 110 kV,

Nürnberg, 16.-17.09.2014

Schmidt, M.; Hess, T.; Lammert, G.; Schegner, P.:

Case Study on Primary Frequency Control with Wind-Turbines and Photovoltaic Plants. PSCC 2014,

Wroclaw, Polen, 18.08.-22.08.2014

Schöttke, S.; Meyer, J.; Schegner, P.; Bachmann, S.:

Emission in the Frequency Range of 2 kHz to 150 kHz caused by electrical vehicle charging. EMC Europe 2014,

Göteborg, Schweden, 01.-04.09.2014

Hess, T.; Werner, J.; Schegner, P.:

Storage Potential of the Local Virtual Power Plant based on  $\mu$ CHP-Devices. IEEE PES T&D 2014,

Chicaco, USA, 14.04.-17.04.2014

Varatharajan, A.; Schoettke, S.; Meyer, J.; Abart, A.:

Harmonic Emission of Large PV Installations - Case study of a 1 MW Solar Campus. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14),

Cordoba, Spanien, 08.-10.04.2014

Werner, J.; Hess, T; Schegner, P.:

The Local Virtual Power Plant - Verify the compliance of  $\mu$ CHPs in the Combined Energy Lab. Industrial Power Engineering,

August 2014

Werner, J.; Schegner, P.:

Das Combined Energy Lab - eine Hardware- in-the-Loop Testumgebung für  $\mu$ KWK-Anlagen. Virtuelle Instrumente in der Praxis 2014,

Fürstenfeldbruck, 22.-24.10.2014

Wille-Haussmann, B.; Brunner, M.; Gerhardt, N.; Kleimaier, M.; Mayrhofer, P.; Poehlmann, A.; Rummeni, J.; von Roon, S.; Werner, J.:

Wärme- und Kälteversorgung in Städten und Regionen mit hohen Anteil an erneuerbaren Energien in der Stromversorgung. VDE Kongress 2014,

Frankfurt (Main), 20.-21.10.2014

Zavoda, F.; Meyer, J.; Dabin, A.; Koo, L.: Current and Future Practice for Selection of Power Quality Monitoring Locations – Position Paper of CIGRE/CIRED JWG C4.112. IEEE PES GM, Washington, USA, Juli 2014

## 3.2 Lehrstuhl Hochspannungs- und Hochstromtechnik

## 3.2.1 Forschungsschwerpunkte und Forschungsprojekte

### Elektrische Kontakte und Verbindungen

Untersuchen der Alterung von ruhenden elektrischen Verbindungen in der Elektroenergietechnik seit 30 Jahren:

- Ermitteln der Grenztemperatur von elektrischen Kontakten und Verbindungen mit beschichteten und unbeschichteten Leitern
- Langzeitverhalten von Steckverbindungen mit Kontaktlamellen z. B. in der Photovoltaik und bei Hochstromanwendungen
- Untersuchen von Armaturen für Hochtemperatur-Freileitungsseile
- Langzeitverhalten von Ganzbereichssicherungen bei erhöhter Umgebungstemperatur
- Ermitteln der physikalischen Mechanismen der Alterung durch Interdiffusion, Kraftabbau, Fremdschichtbildung, Reibverschleiß und Elektromigration
- Modellieren und Berechnen der Alterung von elektrischen Verbindungen und Kontakten

## Hochspannungstechnik

Isolierungen für Hochspannungs-Gleichstromübertragungen:

- Untersuchen des Durchschlagverhaltens von Öl-Papier-Isolierungen
- Ermitteln der Feldverteilung unter Berücksichtigung der Ionendriftvorgänge
- Untersuchen von Druckgasisolierungen bei inhomogenen Temperaturverteilungen
- Dimensionieren von Abschirmelektroden für Freiluftisolierungen

Hochspannungsmaschinenisolierungen:

- Belastung und Lebensdauer der Windungsisolierung bei Impulsspannung
- Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Verhalten des Endenglimmschutzsystems

Untersuchungen zu Elektroimpulsverfahren zur Gesteinszerstörung

# Untersuchen der Stromverteilung und Erwärmung elektrischer Betriebsmittel

Untersuchen der Stromverteilung und Erwärmung elektrischer Betriebsmittel:

- Experimentelle Untersuchungen zur Erwärmung von Betriebsmitteln der Elektroenergietechnik
- Berechnen des thermischen Verhaltens von Betriebsmitteln der Elektroenergietechnik mit der Wärmenetzmethode
- Grundlagenversuche zum Wärmeübergang in Gasen und Flüssigkeiten
- Berechnen des Wärmeübergangs durch Konvektion in Gasen und Flüssigkeiten mit CFD
- Experimentelle Untersuchungen zur Stromverteilung bei Mehrleiteranordnungen
- Berechnen der Stromverteilung bei Mehrleiteranordnungen im Wechselund Drehstromsystem unter Berücksichtigung des Proximity- und des Skin-Effekts

# Projekte zum Forschungsschwerpunkt "Elektrische Kontakte und Verbindungen"



Katrin Bäuml, Dipl.-Ing.

Elektrisches und thermisches Verhalten von elektrischen Kontakten bei tiefen Temperaturen, abhängig von der Strombelastung

Das Langzeitverhalten sowie die Alterungsbedingungen von elektrischen Kontakten bei hohen Temperaturen (über 80 °C) wurden bereits vielfach untersucht. Aufgrund der Entwicklungen auf dem Gebiet der Hochtemperatursupraleiter (HTSL) der zweiten Generation, in Form von REBCO Bandleitern, eröffnen sich Einsatzmöglichkeiten in neuartigen elektrischen Betriebsmitteln, wie z. B. supraleitenden Strombegrenzern, Generatoren oder Motoren. Da HTSL mit siedendem Flüssigstickstoff (LN2,  $\vartheta_{\rm S}$  = -195,8 °C) gekühlt werden, müssen die elektrischen Kontakte zwischen Normalleitern und/oder Supraleitern hinsichtlich ihres elektrischen und thermischen Verhaltens unter diesen Bedingungen untersucht werden.

Es wurden daher Verbindungen mit den Fügetechnologien Klemmen, Kleben und RMS-Löten (RMS = reactive nanometer multilayers) mit unterschiedlichen Materialpaarungen hergestellt und untersucht (Tabelle I). Dabei wurden Kupferbandleiter (Cu), versilberte Kupferbandleiter (Ag) und HTSL mit Silberoder Kupferdeckschicht eingesetzt.

Materialpaarung	Fügetechnik			
iviaterialpaarurig	Klemmen	Kleben	RMS-Löten	
Cu - Cu				
Ag - Ag	Reihen- Reihen-		Reihen-	
HTSL Cu - HTSL Cu	schaltung	schaltung	schaltung	
HTSL Ag – HTSL Ag				
Cu - HTSL Cu	Reihen-/Paral-	Reihen-/Paral-	Reihen-/Paral-	
Ag - HTSL Ag	lelschaltung	lelschaltung	lelschaltung	

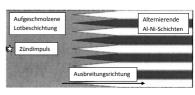
Tabelle I: Übersicht der zu untersuchenden Verbindungen

Beim Klemmen werden die Bandleiter durch das Verspannen zweier Kupferblöcke miteinander verbunden, die von den Bandleitern isoliert sind (Bild I). Zum Herstellen der geklebten Verbindungen wird ein nicht leitfähiger Zwei-Komponenten-Klebstoff verwendet. Um eine Kraft auf die Verbindung während des Aushärtens aufzubringen, wurde eine Fügevorrichtung entworfen und aufgebaut. Beim RMS-Löten wird eine beschichtete Folie bestehend aus mehreren alternierenden Schichten von Aluminium und Nickel eingesetzt.

Durch das Anlegen einer Zündspannung an die Folie wird eine exotherme Reaktion zwischen Aluminium und Nickel ausgelöst. Dabei schmilzt die Lotbeschichtung und die Verbindungspartner werden gelötet. Ein Vorteil des Klebens ist das Fügen ohne Wärmeeintrag in die Verbindungspartner wohingegen beim RMS-Löten die geringsten Fügekräfte benötigt werden. Die geklemmten Verbindungen werden trotz der einfachen Handhabung und der höheren mechanischen Festigkeit der Verbindungen aufgrund des höheren Platzbedarfs nicht uneingeschränkt für jede technische Anwendungen geeignet sein.







(a) Klemmverbindung

(b) Fügevorrichtung zum Kleben

(c) schematische Darstellung der Funktionsweise des RMS-Lötens

### Bild I

Zunächst wurden die Parameter (z. B. die Fügekraft) zum Fügen von Bandleitern mit kleinen Abmessungen hinsichtlich guter elektrischer Eigenschaften und geringer mechanischer Belastung optimiert. Die elektrischen Eigenschaften wurden durch das Messen des Verbindungswiderstands bei Raumtemperatur und dem Bestimmen des Gütefaktors bewertet. Um die grundsätzliche Eignung der Fügetechnologien für den Einsatz in Flüssigstickstoff zu prüfen, wurde ein Teil der Verbindungen für circa 24 h in Flüssigstickstoff gelagert. Im Anschluss erfolgte erneut das Messen des Verbindungswiderstands bei Raumtemperatur, wobei bei keiner der untersuchten Fügetechniken erhöhte Verbindungswiderstände festgestellt wurden.

Mit den optimierten Fügeparametern wurden Verbindungen hergestellt, deren Verbindungswiderstand in Flüssigstickstoff gemessen wurde. Dabei konnten mit allen Fügetechnologien sehr geringe Verbindungswiderstände bzw. Gütefaktoren erzielt werden, die im Vergleich zu den Widerständen bei Raumtemperatur um den Faktor 8 kleiner waren.

Ein Schwerpunkt der weiteren Arbeiten sind Untersuchungen der, in der Praxis häufig notwendigen Parallelschaltung von HTSL und Normalleiter hinsichtlich Stromverteilung und Widerstandsverhalten. Um das thermische Verhalten der Verbindungen zu untersuchen, werden Temperaturkurven bei Stromsteigerungsversuchen aufgenommen. Mit Zugversuchen bei Raumtemperatur und in Flüssigstickstoff wird die mechanische Festigkeit der Verbindungssysteme untersucht.

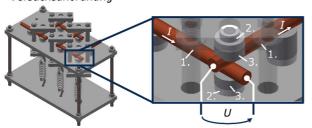


Sebastian Dreier, Dipl.-Wi.-Ing.

Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Fremdschichten auf elektrische Kontakte

Bedingt durch den Ausbau regenerativer Energieerzeugungsanlagen werden elektrische Verbindungen und Kontakte zunehmend in Gebieten mit anspruchsvollen Umweltbedingungen betrieben. Derartige Bedingungen begünstigen chemische Reaktionen wie Oxidation und Korrosion und gehen oftmals mit einem Anstieg des Widerstands ruhender elektrischer Verbindungen und Kontakte einher. Oxid- oder Korrosionsschichten können in die Kontaktfläche hineinwachsen und die stromtragende Kontaktfläche reduzieren. In technischen Kontakten und Verbindungen können verschiedene Alterungsprozesse simultan ablaufen. Die Trennung dieser Prozesse in praktischen Anwendungen ist schwierig und damit der dominierende Alterungsmechanismus oftmals nicht eindeutig [1], [2]. Es wurde bereits gezeigt, dass die Separation der Alterungsmechanismen für das Verständnis der zugrundeliegenden physikalischen Prozesse hilfreich sein kann. Um den Einfluss von Fremdschichten infolge chemischer Reaktionen auf das Langzeitverhalten elektrischer Verbindungen und Kontakte bestimmen zu können, wurden für eine Versuchsanordnung gekreuzter Zylinder ( $d = 10 \,\mathrm{mm}$ ) Langzeitversuche und Versuche bis  $1000 \,\mathrm{h}$  aufgebaut (Bild I), bei denen andere Alterungsmechanismen weitestgehend ausgeschlossen werden können.

### Versuchsanordnung



- 1. Zylinderstäbe
- 2. Thermische & elektrische Isolation
- Sockel

Bild I: Versuchsanordnung für 5 Kontaktpaare gekreuzter Zylinder aus Kupfer und Detailansicht eines Kontaktpaars

Begleitend dazu wurden experimentelle Untersuchungen zum Ausgangszustand der gewählten Kontaktgeometrie durchgeführt und auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM) ein Berechnungsmodell aufgebaut. Die experimentell bestimmten Radien  $r_{\rm t}$  der mechanisch verformten Flächen wurden mit einem Mikroskop ausgemessen und damit das Berechnungsmodell verifiziert.

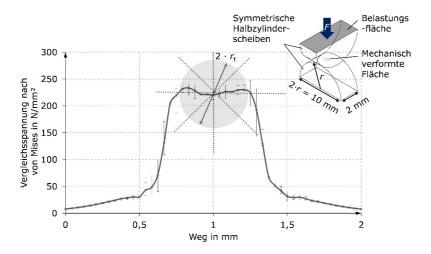


Bild II: Geometrie und berechnete Spannungsverteilung nach von Mises entlang horizontaler, vertikaler und diagonaler Pfade (punktiert) über die mechanisch verformte Fläche (FEM)

Um die Berechnungszeit zu reduzieren, wurde die Originalgeometrie verkleinert und als Halbzylinderscheiben ausgeführt (Bild II). Die Kraft F wird über die horizontale Belastungsfläche auf die Halbzylinderscheiben aufgebracht. Anfangs verformt sich der Werkstoff elastisch und später plastisch. Für den untersuchten Punktkontakt mit dem Werkstoff Kupfer-ETP beginnt der Übergang von elastischer zu plastischer Verformung zwischen (1,5 . . . 4) % der eingestellten Kontaktkraft der Langzeitversuche. Wird der Kontakt oberhalb des Übergangsbereichs beansprucht, dominiert die plastische Verformung und die elastische Verformung ist vernachlässigbar. Bei Beanspruchungen oberhalb der Zugfestigkeit tritt ausschließlich plastische Verformung auf. Die berechnete Spannung liegt unterhalb der Zugfestigkeit des Werkstoffs (Bild II) zwischen 210 und 240 N/mm². Das beanspruchte Material wird solange verdrängt oder verfestigt, bis die mechanische Spannung auf einen Wert unterhalb der Zugfestigkeit abgebaut ist.

Im nächsten Schritt wird das mechanische Berechnungsmodell um beschichtete Kontakte erweitert sowie mit einem bereits erstellten elektrischen Berechnungsmodell zusammengeführt. Dabei soll auch der Einfluss der Fremdschicht auf die Stromverteilung und damit die Alterung untersucht werden.

- [1] S. Dreier, N. Lücke, S. Großmann, Long Term Behavior of Electrical Contacts with Crossed Rods under Various Environmental Conditions, 27th International Conference on Electrical Contacts, 2014.
- [2] S. Dreier, S. Großmann, *Impact of various harsh environmental conditions on the long term behavior of electrical joints*, 26th International Conference on Electrical Contacts, 2012.



Torsten Fuhrmann, Dipl.-Ing.

Langzeitverhalten von Schraubenverbindungen mit vernickelten und versilberten Stromschienen im Vergleich

Langzeitstabile elektrische Verbindungen müssen unmittelbar nach der Montage und vor Inbetriebnahme einen geringen Anfangswert des Verbindungswiderstandes bzw. Gütefaktors haben. Eine gute elektrische Schraubenverbindung mit Stromschienen sollte daher einen Gütefaktor von  $k_{u0}=1,5$  nicht überschreiten. Damit ein geringer Verbindungswiderstand erreicht werden kann, muss neben einer spezifischen Vorbehandlung der Kontaktflächen eine ausreichend hohe Verbindungskraft vorhanden sein.

Für elektrische Verbindungen, die geschraubt oder gleichwertig verbunden sind und in Luft verlegt werden, gilt eine Grenztemperatur von 115 °C für vernickelte bzw. versilberte Kontaktpartner aus Kupfer, Kupfer- und Aluminiumlegierungen gemäß IEC 62271-1:2007/A1:2011 für Hochspannungsschaltgeräte und -anlagen. Trotz gleicher zulässiger Grenztemperatur unterscheiden sich galvanisch abgeschiedene Nickel- und Silberschichten in den elektrischen und mechanischen Eigenschaften. Während Silber die höchste elektrische Leitfähigkeit aller Metalle und die galvanische Beschichtung eine moderate Härte aufweist, haben Nickelbeschichtungen abhängig vom Beschichtungsverfahren eine vielfach geringere elektrische Leitfähigkeit und zusätzlich eine höhere Härte (Tabelle I).

Tabelle I: Physikalische Eigenschaften von Silber- und Nickelschichten

Physikalische Eigenschaften der Schichten	Ni-1	Ni-2	Ag
Spez. el. Widerstand (20 °C) $\rho_{20}$ in $\mu\Omega$ cm	6,84	10 110	1,59
Härte HV	200 500	400 800	28 100
Elastizitätsmodul <i>E</i> in kNmm <sup>-2</sup>	-	55 70	79
Zugfestigkeit R <sub>Z</sub> in Nmm <sup>-2</sup>	350 1600	200 1000	190 380
Schmelztemperatur $\vartheta_{\rm S}$ in ${}^{\circ}{\rm C}$	1450	880 1360	960

Trotz der unterschiedlichen Eigenschaften von Nickel und Silber als Beschichtungsmaterialien besteht die Forderung nach langzeitstabilen elektrischen Verbindungen bei gleichen Betriebsbedingungen. Basierend auf den Ergebnissen der bereits durchgeführten Untersuchungen zur Vorbehandlung nickelund silberbeschichteter Kontaktflächen, wurde diese für die Verbindungen in den Langzeitversuchen festgelegt. Versilberte Kontaktflächen werden mit Ethylalkohol gereinigt. Bei nickelbeschichteten Kontaktflächen muss zusätzlich die Nickel-Oxidschicht mit einem Schleifvlies entfernt werden. Dieser Unter-

schied ist bei der Montage zu berücksichtigen [1]. In Langzeitversuchen wurden Schraubenverbindungen mit Stromschienen aus verschiedenen Kupferund Aluminiumsorten sowie mit unterschiedlichen Schichtsystemen und -dicken gealtert. Unter anderem erfolgte dies stromdurchflossen in Hochstromkreisen bei einer Temperatur von 115 °C. [2] Es wurden zwei unterschiedliche Nickelbeschichtungen verwendet.

Verbindungen mit nickelbeschichteten Stromschienen hatten aufgrund des höheren spezifischen elektrischen Widerstands und der höheren Härte der Nickelschicht bereits im Ausgangszustand höhere Verbindungswiderstände im Vergleich zu denen mit silberbeschichteten Kontaktpartnern (Bild I).

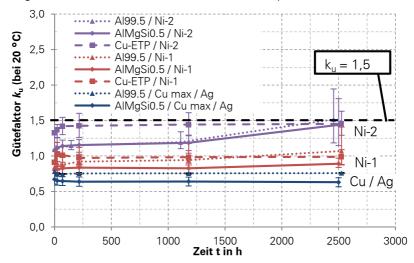


Bild I: Gütefaktor von Schraubenverbindungen mit unterschiedlich beschichteten Stromschienen abhängig von der Betriebszeit (gealtert bei 115°C) [2]

Der Vergleich unterschiedlicher Materialien der Stromschienen zeigt, dass die Gütefaktoren von Verbindungen mit vernickelten Stromschienen aus Kupfer höher aber abhängig von der Zeit konstant sind. Im Gegensatz dazu haben sich die Gütefaktoren insbesondere bei Verbindungen mit Ni-2 beschichteten Stromschienen aus Aluminium während der Betriebszeit erhöht. Ob chemische Reaktionen auf der Nickeloberfläche in der Kontaktfläche der Verbindungen oder strukturelle Veränderungen in der Nickelschicht der Grund für diesen Anstieg sind, wird derzeit näher untersucht. Nach längerer Betriebszeit wird sich zeigen, wie stark die Alterung das Langzeitverhalten beeinflusst.

- [1] T. Fuhrmann, Jahresbericht 2013, Dresden 2013
- [2] T. Fuhrmann, et al.: Comparison between nickel and silver as coating materials of conductors made of copper or aluminum used in electric power engineering. 27th International Conference on Electrical Contacts, Dresden, 2014



Michael Gatzsche, Dipl.-Ing.

Stationäres elektrisch-thermisches Betriebsverhalten von Kontaktelementen in Hochstrom-Steckverbindungen

Hochstromsteckverbindungen werden im Bereich der Elektroenergieübertragung und -verteilung eingesetzt. Der elektrische und thermische Kontakt der Leiter 1 und 2 wird mit federnden Kontaktelementen hergestellt (Bild I).



Bild I: Aufbau einer Hochstrom-Steckverbindung mit federndem Kontaktelement [1]

Um die Steckverbindungen für den Dauerbetrieb zu qualifizieren, darf bei einer Erwärmungsprüfung bei versilberten Kontakten die Grenztemperatur von 105 °C nicht überschritten werden [2]. Die Grenztemperatur gilt für die messtechnisch zugänglichen Bereiche der Leiter (Bild II).

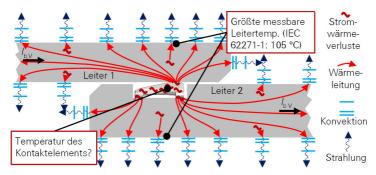


Bild II: Wärmebilanz einer Hochstrom-Steckverbindung im Dauerbetrieb mit dem Belastungsstrom  $I_{\rm DV}$ 

Die Kontaktelemente haben meist einen kleineren Querschnitt und damit eine größere Verlustleistungsdichte als die Leiter; es kommt zum Wärmestrom von den Kontaktelementen in die Leiter (Bild II). Die Temperatur in den Kontaktelementen soll abhängig vom Belastungsstrom berechnet werden. Zum Erstellen des auf der Wärmenetzmethode basierenden Rechenmodells [1] werden elektrische und thermische Eingangsgrößen benötigt (I).

T	aktelement mit de	m vvarmenetz	
Physik	Größe	Bedeutung	ermittelt mit
elektrisch	Materialwiderstand	Erzeugen von Wärme in Leitern und Kontaktelement	numerischer Rechnung
	Kontaktwiderstand	Erzeugen von Wärme in den Kontakten	Messung
thermisch	Materialwiderstand	Ausbreiten der Wärme in Kontaktelement und Leitern	numerischer Rechnung
	Kontaktwiderstand	Übergang der Wärme vom Kontaktelement in die Leiter	Messung

Tabelle I: Eingangsgrößen zum Berechnen der Temperaturverteilung am Kontaktelement mit dem Wärmenetz

Die Eingangsgrößen wurden exemplarisch für ein typisches Hochstrom-Kontaktelement *Multilam* ermittelt (Bild I) und die Temperaturverteilung am Kontaktelement abhängig vom Belastungsstrom bei konstanter Leitertemperatur von 105 °C berechnet (Bild III).

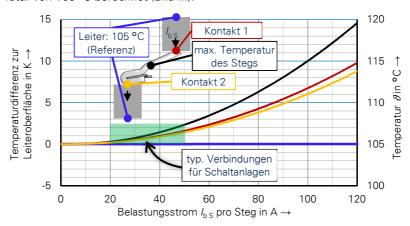


Bild III: Stationäre Temperaturverteilung in einer Hochstrom-Steckverbindung, abhängig vom Belastungsstrom pro Steg  $I_{\rm bS}$ 

Die größte Temperatur tritt im Steg des Kontaktelements und nicht in den Kontakten selbst auf, da der Steg den elektrischen und thermischen Mittelpunkt der Verbindung bildet (Bild II). Bei typischen Verbindungen für Schaltanlagen mit Belastungsströmen im Bereich (20 ... 50) A/Steg ist die Kontaktelementtemperatur nur minimal größer als die auf 105 °C limitierte Leitertemperatur (< 3 K).

- [1] M. Gatzsche, N. Lücke, S. Großmann, T. Kufner, B. Hagen, G. Freudiger, *Electric-Thermal Performance of Contact Elements in High Power Plug-In Connections*, 60th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 2014.
- [2] IEC 62271-1 Ed. 1.1 2011-08: High-Voltage Switchgear and Controlgear Part 1: Common Specifications, 2011



Christian Hildmann, Dipl.-Ing.

Elektrisches Modell zum Bewerten des Kontaktverhaltens von elektrischen Verbindungen unter Berücksichtigung der Geometrie

Der Verbindungswiderstand  $R_V$  einer elektrischen Verbindung setzt sich aus dem Kontaktwiderstand  $R_{\rm K}$  und den Materialwiderständen  $R_{\rm M1}$  und  $R_{\rm M2}$  der beiden Kontaktpartner zusammen. Für eine Vielzahl von elektrischen Verbindungen mit großvolumigen Verbindern, wie z. B. Pressverbindungen bei Freileitungsseilen, dominiert der Materialwiderstand des Verbinders den Verbindungswiderstand. Das Vergleichen des Kontaktverhaltens unterschiedlicher Verbindungen gleicher oder ähnlicher Technologie ist damit objektiv nicht mehr möglich. Wird für eine elektrische Verbindung angenommen, dass alle Mikrokontakte gleich groß und auf der scheinbaren Kontaktfläche gleich verteilt sind, kann ein zweidimensionales elektrisches Ersatzschaltbild mit infiniten Widerstandselementen erstellt werden (Bild I) [1]. Sind die spezifischen Materialwiderstände der Kontaktpartner und der Verbindungswiderstand bekannt, so kann der spezifische Querwiderstand  $R_q$  ermittelt werden (Gl. (1)). Dieser spezifische Querwiderstand  $R_q$  ist eine, für das elektrische Modell benötigte Ersatzgröße, mit der das Kontaktverhalten der genannten Verbindungen bewertet und verglichen werden kann. Ist hingegen der spezifische Querwiderstand gegeben, können beispielsweise der Verbindungswiderstand und die Längsstromverteilungen  $i_{1x}$  und  $i_{2x}$  sowie die Querstromverteilung  $i_{qx}$  berechnet werden (Bild I).

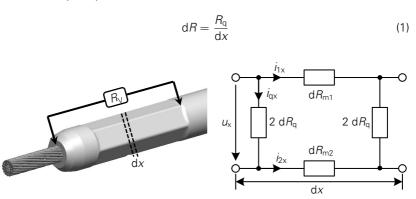


Bild I: Elektrisches Modell mit infiniten Elementen

Des Weiteren kann aus dem Ersatzschaltbild mit infiniten Elementen ein vereinfachtes Ersatzschaltbild bestehend aus drei Ersatzwiderständen ( $R_{ers\,m1}$ ,  $R_{ers\,m2}$ ,  $R_{ers\,m2}$ ) hergeleitet werden (Bild II). Dazu wird für einen beliebigen Ge-

samtstrom I die Summe der Verlustleistungen in jeweils allen infiniten Widerstandselementen d $R_{\rm m1}$ , d $R_{\rm m2}$  und d $R_{\rm q}$  ermittelt (Bild I). Die Verlustleistung des jeweiligen Ersatzwiderstands ist dann gleich der Summe der Verlustleistung der jeweiligen infiniten Widerstände.



Bild II: Vereinfachtes Ersatzschaltbild

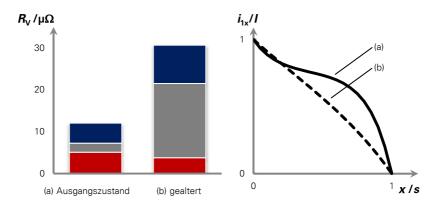


Bild III: Anteile des Verbindungswiderstands und relativer Strom  $i_{1x}/I$  in einem Kontaktpartner abhängig von der Alterung

Es wird angenommen, dass sich der Verbindungswiderstand  $R_{\rm V}$  einer beliebigen Verbindung abhängig von der Zeit durch die Alterung erhöht. Die Berechnung mit dem vereinfachten Ersatzschaltbild zeigt, dass der höhere Verbindungswiderstand insbesondere auf den höheren Ersatz-Querwiderstand  $R_{\rm ers\,q}$  zurückzuführen ist (Bild III - links). Gleichzeitig verändert sich der Beitrag der Ersatz-Materialwiderstände zum Verbindungswiderstand. Die Ursache dieses Verhaltens ist die sich ändernde Stromverteilung in den Kontaktpartnern, die mit dem Ersatzschaltbild mit infiniten Elementen berechnet wird. Erhöht sich also der Kontaktwiderstand und damit der spezifische Querwiderstand, so wird die Verteilung des Stroms in den Kontaktpartnern zunehmend linear (Bild III – rechts). Die veränderte Stromverteilung hat dabei auch eine veränderte Verlustleistung in den Kontaktpartnern zur Folge. Ein höherer Verbindungswiderstand in Folge von Alterung ist damit auch auf sich ändernde Materialwiderstände zurückzuführen.

[1] Möcks, L.: Die Stromverteilung in der Starkstromklemme. Elektrie, 1995, vol. 49, no. 8/9, S. 299–303.



Christian Kühnel, Dipl.-Ing.

Untersuchungen zur Grenztemperatur von Sicherungseinsätzen bei erhöhter thermischer Beanspruchung

Zum Schutz elektrotechnischer Betriebsmittel vor thermischer Überlast und vor Kurzschlussströmen werden in Niederspannungsnetzen überwiegend Ganzbereichs-Niederspannungs-Hochleistungssicherungen (NH-Sicherungen) eingesetzt. Diese zählen aufgrund ihrer Zuverlässigkeit und einem einfachen, kostengünstigen Konstruktionsprinzip zu den wichtigsten Überstromschutzeinrichtungen. Jedoch sind die Sicherungseinsätze aufgrund wirtschaftlicher Aspekte, steigender Strombelastung und dem Einfluss erneuerbarer Energien zunehmend höheren Anforderungen ausgesetzt. So werden Sicherungseinsätze, z.B. in Sicherungs-Lastschaltleisten, in sehr kleinräumigen, meist unbelüfteten Anlagen bei erhöhten Umgebungstemperaturen betrieben. Vor allem im Umfeld von Anlagen zur regenerativen Energieerzeugung, z.B. bei Biogas- oder Photovoltaikanlagen, werden Sicherungseinsätze zudem häufig mit ihrem Bemessungsstrom belastet. In Kombination mit einem teilweisen Erhöhen der Grenztemperatur für angeschlossene Betriebsmittel führt dies zu einer höheren thermischen Beanspruchung und einer beschleunigten Alterung der Sicherungseinsätze (Bild I).

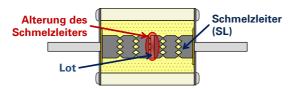


Bild I: Sicherungseinsatz mit Schmelzleiter und Lotauftrag

Ein dominanter Mechanismus ist dabei der temperaturabhängige Prozess der Interdiffusion zwischen Schmelzleiter und Lot (Bild I). Dieser ist für den erfolgreichen Schaltvorgang bei Überlast unerlässlich, kann jedoch bei sehr hoher thermischer Beanspruchung im normalen Betrieb zu einer beschleunigten Alterung des Sicherungseinsatzes führen. In der Folge werden der elektrische Widerstand der Schmelzleiter, damit die Verlustleistung und die Temperatur des gesamten Sicherungseinsatzes stetig höher. Fehlabschaltungen oder Schaltversagen können die Folge sein. Die Schmelzleitertemperatur an der lotbeschichteten Engstelle ist daher das maßgebliche Kriterium für einen langzeitstabilen Betrieb eines Sicherungseinsatzes.

In Langzeitversuchen wurde deshalb das Verhalten unterschiedlicher Materialkombinationen (Schmelzleiter, Lot) bei Temperaturen von 140 °C bis 230 °C untersucht. Dabei wurde bisher festgestellt, dass vor allem Schmelzleiter mit einem Weichlot höherer Schmelztemperatur besser für den Einsatz bei er-

höhter thermischer Beanspruchung geeignet scheinen [1]. Aufbauend auf den bisherigen Ergebnissen werden weitere Langzeitversuche mit Schmelzleitern und Sicherungseinsätzen durchgeführt, um den Einfluss der Alterungsmechanismen auf das Betriebsverhalten abhängig von der Schmelzleiter/Lot-Kombination von Sicherungseinsätzen bewerten und in der Folge Grenztemperaturen der Schmelzleiter für einen langzeitstabilen Betrieb der Sicherungseinsätze herleiten zu können.

Da im praktischen Betrieb ein Messen der Schmelzleitertemperaturen nicht möglich ist, wurde in vorangegangenen Untersuchungen ein Wärmenetzmodell aufgebaut und verifiziert, das in einem ersten Schritt ein Berechnen der Schmelzleitertemperaturen eines Sicherungseinsatzes frei in Luft und abhängig von verschiedenen Betriebsbedingungen ermöglicht. An diesem Wärmenetz wurde eine Parameterstudie durchgeführt, in der unabhängig voneinander der Einfluss der Umgebungstemperatur und der Messertemperatur auf die maximale Schmelzleitertemperatur untersucht wurde (Bild II).

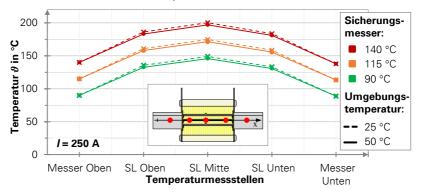


Bild II: Einfluss der Umgebungs- und Messertemperatur auf die Temperaturverteilung innerhalb des Sicherungseinsatzes

Die Parameterstudie zeigt, dass die Temperaturen der Sicherungsmesser, die hier stellvertretend für die Temperaturen der Sammelschienenanschlüsse oder Kabelabgänge stehen, einen dominanten Einfluss auf die Schmelzleitertemperatur haben. In Kombination mit einer vergleichsweise unkompliziert möglichen Temperaturmessung im praktischen Betrieb macht das die Temperatur des Sicherungsmessers zu einer geeigneten Größe, um den Schmelzleiter thermisch zu beurteilen. Eine Erweiterung des Berechnungsmodells hin zu praktischen Einsatzbedingungen soll zukünftig das Berechnen der Schmelzleitertemperatur abhängig von den Betriebsbedingungen ermöglichen. In Kombination mit der Kenntnis der Alterungsmechanismen wird damit die Angabe einer physikalisch bestimmten maximalen Messertemperatur für einen langzeitstabilen Betrieb von Sicherungseinsätzen möglich.

[1] Kühnel, C.; Schlegel, S.; Großmann, S.: Untersuchungen zur Überlastabschaltung von Ganzbereichssicherungen bei erhöhter Sammelschienen- und Umgebungstemperatur. 22. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, VDE Fachbericht 69, 2013



Stephanie Pfeifer, Dipl.-Ing.

Vergleich genormter Prüfverfahren und -kriterien mit Erkenntnissen aus wissenschaftlichen Untersuchungen

Für elektrische Prüfungen nach Norm an Verbindungen der Energietechnik werden im Allgemeinen Wechsellastprüfungen mit bis zu 1000 Zyklen gefordert [1], [2]. Im Vergleich zur Dauerlast werden die Verbindungen dabei mit einer geringeren mittleren Temperatur belastet. Die Lebensdauer elektrischer Verbindungen wird vor allem durch Alterungsprozesse bestimmt, die stark temperaturabhängig sind (Arrhenius-Gesetz). Um den Einfluss der Belastungsart auf die Ergebnisse der Prüfung zu untersuchen, wurden Schraubenverbindungen mit unbeschichteten Stromschienen aus Al99,5 und Cu-ETP in zwei identischen Versuchen aufgebaut und jeweils mit Dauerlast oder Wechsellast (DL/WL) beaufschlagt. Das verwendete Verbindungssystem ist erfahrungsgemäß nicht langzeitstabil, sodass in einer definierten Zeit ein Ausfall erreicht wird. Damit die Ergebnisse vergleichbar sind, wurde in beiden Versuchen die von den angrenzenden Verbindungen unbeeinflusste Temperatur des homogenen Leiters an einer Referenzmessstelle gemessen (Bild la). Über eine einfache Zweipunkt-Steuerung, die den Betriebsstrom zu- und abschaltete wurde die Temperatur an der Referenz-Messstelle zwischen 30 °C und 90 °C geregelt. Ein Zyklus bestand aus einer Aufheiz- und einer Abkühlphase. Dabei wurden keine Plateau- oder Pausenzeiten realisiert (Bild Ic).

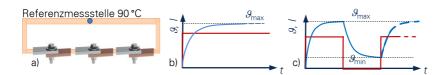


Bild I: (a) Versuchsaufbau (schematisch), Belastungsstrom- und Temperatur: (b) Dauerlast, (c) Wechsellast

Es ist zu erkennen, dass sich bei Dauerlast der Widerstand der Verbindungen bereits nach einer sehr kurzen Versuchsdauer stark erhöht und die Verbindungen als ausgefallen bewertet werden müssen (Bild II). Zu diesem Zeitpunkt (ca. 3800 h) werden im Wechsellastversuch etwa die geforderten 1000 Zyklen erreicht. Das Prüfkriterium RV < 1,5 RV0 ist bei Wechsellast zu diesem Zeitpunkt für einige Verbindungen noch erfüllt, die elektrische Prüfung nach Norm wäre bestanden. Dennoch sind Verbindungen aus Aluminium und Kupfer nicht langzeitstabil. Der Widerstand dieser Verbindungen steigt weiter stetig an, bis sie nach etwa 7540 Zyklen (ca. 2 Jahre) ausfallen.

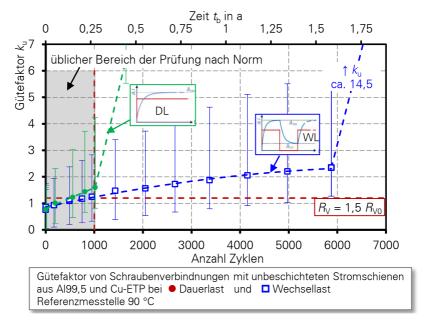


Bild II: Einfluss von Dauerlast und Wechsellast auf den Gütefaktor von Schraubenverbindungen mit Stromschienen aus Aluminium und Kupfer

Zusammenfassend kann aus dem Vergleich zwischen Wechsellast und Dauerlast geschlussfolgert werden, dass die Dauerlast durch die konstant hohe Temperatur die kritischere Belastung ist. Vorzeitige Ausfälle von Schraubenverbindungen können dadurch schon eher erkannt werden als durch eine Prüfung mit Wechsellast.

Schraubenverbindungen mit Stromschienen aus Aluminium und Kupfer sind nicht langzeitstabil, wobei ein Ausfall der Verbindungen bei den durchgeführten Versuchen durch das Wachsen von IMP ausgeschlossen werden kann, da keine intermetallischen Phasen im Kontaktbereich nachgewiesen werden konnten. Der Ausfall muss auf andere Alterungsmechanismen zurückgeführt werden. Ähnlich wie im System Aluminium-Silber [3] wird hier der Einfluss von Sauerstoff, also die Oxidbildung als Ursache vermutet. Dazu werden in einem neuen Aif-Projekt zum Thema Sauerstoffdiffusion weiterführende Untersuchungen durchgeführt.

- [1] DIN 61284:1997: Freileitungen Anforderungen und Prüfungen für Armaturen
- [2] DIN EN 60999:2000: Verbindungsmaterial Elektrische Kupferleiter Sicherheitsanforderungen für Schraubklemmstellen und schraubenlose Klemmstellen
- [3] Jahresbericht IEEH 2013



Alexander Ramonat, Dipl.-Ing.

Technologie zum langzeitstabilen Verbinden von zylindrischen Leitern aus Aluminium

Elektrische Verbindungen zwischen zylindrischen Leitern aus Aluminium werden speziell im Bereich gasisolierter Schaltanlagen (GIS) und Leitungen (GIL) eingesetzt. Dabei werden nicht lösbare Verbindungen oder lösbare Steckverbindungen zum Ausgleich von Relativbewegungen verwendet. Zum Herstellen der nicht lösbaren Verbindungen können z. B. Fügeverfahren wie das Längs- und Querpressen, das Fügen durch Umformen und die elektromagnetische Pulstechnologie (EMPT) angewendet werden (Tabelle I). Bei Verbindungen, die mit diesen Fügeverfahren hergestellt werden, ist es von Interesse wie sich der Verbindungswiderstand und der Kraftabbau abhängig von der Zeit verhalten. Schwerpunkt der Arbeiten ist es, dieses Verhalten zu bestimmen und die optimalen Fügeparameter zu ermitteln.

Tabelle I: Übersicht über die untersuchten Verbindungstechnologien

	Längspressen Querpressen		Fügen durch Umformen	EMPT	
Füge- verfahren	<b>↓</b> <i>F</i>	F		B 8) © © (8) 6 © © 9)	
Prinzip	Äußere Kraft beim Einpressen	Kraft durch Wärmeaus- dehnung des Inlets	Umformen des Leiterrohrs durch Walzen	Kraftwirkung eines äußeren magnetischen Felds	
Vorteile für die elektr. Kontakt- bildung	Hohe Relativ- bewegung zw. Verbindungs- partnern	Große resultierende Kräfte, Hoher scheinbarer Kontaktdruck	Hoher Umformgrad des Leiterrohrs	Hoher Umformgrad des Leiterrohrs, hohe Aufprall- geschwindigkeit	
Heraus- forde- rungen	Einfluss des Kraftabbaus unbekannt	Einfluss des Kraftabbaus unbekannt	Modellversuche nötig, Skalieren auf reale Maße	Aufbrechen der Fremdschich- ten, Fügepara- meter	

Dabei werden Grundlagenuntersuchungen an Verbindungen mit einem Leiterrohr und einem Inlet aus Aluminium durchgeführt. Es werden Kurzzeitversuche im Wärmeschrank mit einer großen Variation der Fügeparameter durchgeführt und anschließend auf Basis der Ergebnisse stromdurchflossene Langzeitversuche mit einem reduzierten Probenumfang aufgebaut. Des Weiteren wird ein Teil der Proben aus den Kurz- und Langzeitversuchen für metallogra-

phische Untersuchungen genutzt. Mit den Untersuchungen sollen zeitabhängige Änderungen im Gefüge unmittelbar im Bereich des Kontakts und der mechanischen Eigenschaften ermittelt werden. Ein weiteres Ziel der Arbeiten ist das Modellieren ausgewählter Verbindungstechnologien, um Parameterstudien durchführen zu können. Beispielhaft werden folgend die ersten Ergebnisse aus den Vorversuchen mit Längspress-Verbindungen vorgestellt.

Beim Längspressen wird das Inlet mit einem Übermaß  $\ddot{u}$  in ein Leiterrohr mit einer Einpresskraft  $F_{\rm E}$  längs eingeschoben. Das Übermaß bestimmt dabei die Einpresskraft in axiale und die Kontaktkraft in radiale Richtung. In Vorversuchen wurde der Verbindungswiderstand abhängig vom Übermaß  $\ddot{u}$  und der Vorbehandlung der Kontaktpartner untersucht. Bei ersten Einpressversuchen wurde deutlich, dass die Kontaktflächen vor dem Fügen zu fetten sind. Durch das Fetten der Kontaktflächen wurde die nötige Einpresskraft um den Faktor 10 reduziert ohne, dass sich der Verbindungswiderstand signifikant erhöhte (Bild I).

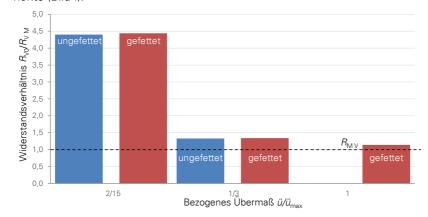


Bild I: Widerstandsverhältnis  $R_{\rm V0}/R_{\rm VM}$  abhängig vom bezogenen Übermaß  $\ddot{u}/\ddot{u}_{\rm max}$ 

Aufgrund der hohen Relativbewegung zwischen den Verbindungspartnern können sehr kleine Verbindungswiderstände erreicht werden. Es wurde der Anfangswert des Verbindungswiderstands  $R_{\rm V0}$  der Proben mit einem Mikroohmmeter bestimmt. Die Ergebnisse wurden auf den Materialwiderstand  $R_{\rm VM}$  der Verbindung bei idealer Kontaktierung zwischen Leiterrohr und Inlet (Kontaktwiderstand  $R_{\rm K}=0$ ) normiert. Der ideale Materialwiderstand der Verbindung unter Berücksichtigung der Stromumlenkung wurde mit einem FF-Modell berechnet



Stephan Schlegel, Dr.-Ing.

## Elektrische Eigenschaften umformtechnischer Verbindungen

Um die Effizienz von Kraftfahrzeugen zu erhöhen, wird konsequent auf Leichtbau zum Reduzieren des Gewichts gesetzt und das Antriebskonzept immer weiter optimiert. Durch den Einsatz neuer Verbundwerkstoffe im Karosseriebau, die Substitution von Leitern aus Kupfer durch Aluminium und die Weiterentwicklung von Hybridantrieben konnten in den vergangen Jahren große Fortschritte erzielt werden. Jeder Fortschritt generiert aber auch neue Herausforderungen, die neue Lösungsansätze erfordern. Durch die Idee, bisher rein mechanisch genutzte Verbindungen von Karosserieteilen zum Stromtransport zu verwenden, können z. B. Rückleitungen von Verbrauchern eingespart werden. Diese Funktionsintegration erfordert es, die Verbindungen elektrisch zu qualifizieren und die Fügeparameter zu optimieren. Eine besondere Herausforderung liegt darin, dass die Kontaktflächen vor dem Fügen der Kontaktpartner aufgrund der Forderung nach Korrosionsschutz nicht vorbehandelt werden können. Es muss also während des Fügeprozesses eine gute elektrische Kontaktierung zwischen den Kontaktpartnern entstehen, die den Anforderungen im Einsatz genügt und langzeitstabil ist. Hierzu wurden unterschiedliche Fügeverfahren untersucht, klassifiziert und bewertet (Bild I). [1]

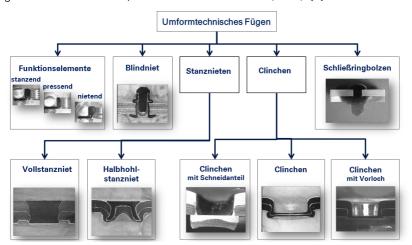
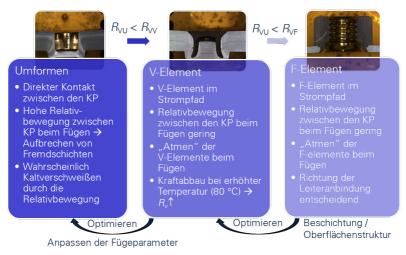


Bild I: Übersicht umformtechnischer Fügeverfahren (Auswahl) [1]

Ziel der Untersuchungen war es zunächst die derzeit eingesetzten, insbesondere mechanisch optimierten Fügeverfahren zu betrachten. Hinsichtlich der Einsatz- und Umgebungsbedingungen wurden thermische, mechanische und korrosive Belastungen untersucht. Thermisch wurden alle Proben bei Raumtemperatur, im Wärmeschrank bei einer konstanten Temperatur von 80 °C oder 125 °C sowie bei Wechsellast stromdurchflossen geprüft. Mechanisch erfolgten die Untersuchungen bei statischer mechanische Belastung bei Raumtemperatur und 80 °C sowie zyklischer mechanischer Belastung nur bei Raumtemperatur. Die Korrosionsbeständigkeit wurde nach DIN EN 9227:2012 im neutralen Salzsprühnebel untersucht. In den elektrischen Langzeitversuchen wurden der Verbindungswiderstand und der Gütefaktor abhängig von der Zeit bestimmt. Anschließend wurden die Fügeverfahren bewertet und klassifiziert.



RVU ... Verbindungswiderstand - Fügen durch Umformen

RVV ... Verbindungswiderstand - Fügen mit Verbindungselementen

RVF ... Verbindungswiderstand - Fügen mit Funktionselementen

KP ... Kontaktpartner V ... Verbindung F ... Funktion RV ... Verbindungswiderstand

Bild II: Klassifizierte Ergebnisse aus den Langzeitversuchen (Übersicht) [1]

Der bei umformtechnisch hergestellten Verbindungen erreichte Verbindungswiderstand war im Mittel geringer als bei denen mit Verbindungselementen oder Funktionselementen. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass durch Anpassen der Fügeparameter oder Beschichten der Oberfläche von Verbindungsoder Funktionselementen die elektrischen Eigenschaften der bestehenden Fügeverfahren optimiert werden können. Dabei ist insbesondere das elektrische Langzeitverhalten bei entsprechender Einsatztemperatur zu berücksichtigen und zu untersuchen. Die Optimierung der elektrischen Eigenschaften der Verbindungssysteme ist Gegenstand des Folgeprojekts.

[1] Füssel, U.; Großmann, S.; Kalich, J.; Schlegel, S.; Schmid, J.: Elektrisches Eigenschaftsprofil um formtechnischer Fügeverbindungen, EFB Forschungsvorhaben AiF/EFB 16952BR

### Projekte zum Forschungsschwerpunkt "Hochspannungstechnik"



Karsten Backhaus, Dipl.-Ing.

Ladungsträgerbasierte Berechnung der dielektrischen Leitfähigkeit mineralischen Isolieröls

Die Öl-Papier-Isolierung eines Leistungstransformators für die auf Thyristoren basierte Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung ist einer komplexen Belastung aufgrund der Überlagerung mehrerer Spannungsarten ausgesetzt. Bei der Werksprüfung dieser Betriebsmittel muss eine Gleichspannungsprüfung bestanden werden, sodass das Isoliersystem entsprechend zu dimensionieren ist.

Um die Feldstärkeverteilung und damit die Belastung innerhalb einer Mischisolationssystems wie Öl-Papier berechnen zu können, bedarf es dabei der genauen Kenntnis des dielektrischen Verhaltens der einzelnen Isolierwerkstoffe. Bisher wurde von einem reinen ohmsch-kapazitiven Verhalten dieser ausgegangen. Es konnte bereits mehrfach gezeigt werden, dass die Leitfähigkeit ölbasierter Isolierwerkstoffe keinen ohmschen Charakter besitzt. So sind im Gegensatz zu Metallen, welche sich ohmsch verhalten, nur geringe Ladungsträgerkonzentrationen vorhanden. Isolieröle sind zudem durch mehrere Ladungsträgerarten gekennzeichnet, welche sich hinsichtlich Vorzeichen, Beweglichkeit und Rekombinationsverhalten unterscheiden: Anionen und Kationen als intrinsische Ladungsträger des Öls sowie Elektronen und Löcher als in das Öl injizierte Ladungsträger. Diese Art von Leitfähigkeit ähnelt eher der von Halbleitern und kann mit der Poisson-Nernst-Planck-Gleichung (PNP), einem Differentialgleichungssystem zweiter Ordnung, berechnet werden.

Die Poisson-Gleichung (1) beschreibt das elektrische Feld unter der Einwirkung der Summe aller Ladungsträgerspezies des Isolieröls mit ihren jeweiligen Eigenladungen.

$$\Delta \varphi = \frac{e}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \sum_{i} z_i n_i \tag{1}$$

Die Nernst-Planck-Gleichungen (2) beschreiben als zeitabhängige Konzentrationsänderung das Driftverhalten im elektrischen Feld mit einer bestimmten Mobilität  $\mu_i$  und der Diffusion mit dem Koeffizienten  $D_i$  pro Ladungsträgerspezies.

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = \nabla (z_i \mu_i n_i \nabla \varphi + D_i \nabla n_i) + r_{\text{Ionisation}} + \sum_{ij} r_{\text{Rekombination}}$$
 (2)

Mit der Summe der Quellterme der rechten Seite lassen sich Ionisationsund Rekombinationsprozesse beschreiben. Bild I zeigt exemplarisch den berechneten Gesamtstrom und die Teilströme einer einmaligen Gleichspannungsbelastung einer Ölstrecke.

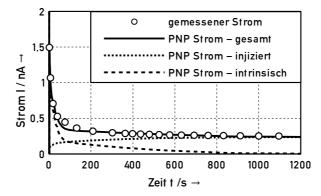


Bild I: Ladungsträgerabhänige Stromanteile

Gemäß der Annahmen der physikalischen Eigenschaften der Ladungsträger beruht der Polarisationsanteil des gemessenen Stroms auf dem Anteil durch die ölintrinsischen Ladungsträger, welche als Mizellen die Grenzschicht zu metallischen Elektrode polarisieren. Der restliche Stromanteil wird durch die aus den Elektroden zusätzlich injizierten Ladungsträger verursacht.

Wie in [1] gezeigt wird, können durch die den einzelnen Ladungsträgerspezies zugeordneten physikalischen Eigenschaften sowohl das Strom-Zeit-Verhalten als auch die Feldstärkeverteilung im Dielektrikum in Zusammenhang gebracht werden.

[1] K. Backhaus, J. Speck, M. Hering, S. Großmann, R. Fritsche, *Nonlinear dielectric behaviour of insulating oil under HVDC stress as a result of ion drift*. ICHVE, Poznan 2014.



Maria Hering, Dipl.-Ing.

Überschlagsverhalten von Isolatoren in gasisolierten Gleichspannungssystemen

Der Bedarf an platzsparenden Schaltanlagen erfordert den Einsatz kompakter, gasisolierter Systeme. Metallische Partikel – trotz hoher Qualitätsstandards bei Fertigung und Montage nicht völlig auszuschließen – erweisen sich in den typischerweise schwach inhomogenen Anordnungen als besonders kritische Feldstörung, da sie das Isolationsvermögen der Anlage herabsetzen. Gleichzeitig beeinflussen die an den Partikelspitzen produzierten Ladungsträger insbesondere bei Gleichspannungsbetrieb die Aufladung von Isolierstoffteilenund damit das Überschlagsverhalten der Feststoffisolatoren.

Im Vergleich zu Wechselspannungsanwendungen wird das Gleichspannungsfeld von zum Teil temperaturabhängigen Leitfähigkeiten der Isoliermaterialien bestimmt. Betriebsströme führen zu einer inhomogenen Temperaturverteilung zwischen Innenleiter und Gehäuse. Der radial angeordnete Isolator erfährt somit den vollen Temperaturgradienten. Da sich die Leitfähigkeit des Isolators in diesem Temperaturbereich um mehrere Größenordnungen verändert, bildet sich das Feld nach Zuschalten einer Gleichspannung vom elektrostatischen Feld ( $\varepsilon$ -dominiert) zum stationären Strömungsfeld ( $\kappa$ -dominiert) um. Dieser sogenannte kapazitiv-resistive Übergang (Bild I) wurde in einer Modellanordnung mit erwärmter Erdelektrode unter realitätsnahen geometrischen Abmessungen und Feldstärken untersucht.

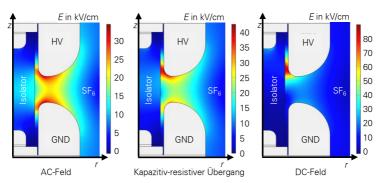


Bild I: Übergang vom elektrostatischen Feld (AC) zum stationären Strömungsfeld (DC) bei erwärmter Erdelektrode (GND) und einer inhomogenen Temperaturverteilung am Isolator

Die praktischen Untersuchungen bestätigen, dass sich der Ort der Höchstfeldstärke in den Spalt zwischen Isolator und kälterer Elektrode verschiebt.

Da sich im Vergleich zum AC-Feld eine absolut höhere Feldstärke einstellt, ist das Isolationsvermögen der Anlage unter Gleichspannungsbedingungen deutlich herabgesetzt. Für die Weiterentwicklung des Isolationssystems unter DC-Belastung stellt diese Feldumbildung eine besondere Herausforderung dar [1].

Beeinflusst wird der kapazitiv-resistive Übergang von zusätzlich generierten Ladungsträgern, z.B. durch Teilentladungen (TE) an Störstellen. Die Untersuchungen zeigen, dass feste Metallpartikel auf Isolatoroberflächen das Isolatorobermögen der Anlage negativ beeinflussen [2]. TE sind bereits weit unterhalb der Durchschlagsspannung der ungestörten Anordnung möglich. Bei Gasdrücken bis 0,25 MPa können durch den Koronastabilisierungseffekt noch relativ hohe Durchschlagsspannungen erreicht werden. Oberhalb von 0,3 MPa verschwindet dieser, sodass eine Entladungszündung sofort zum Durchschlag führt. Auch mit Druckerhöhung steigt dann die Durchschlagsspannung nicht weiter an (Bild II).

Ziel während der Inbetriebnahme muss es deshalb sein, etwaige Partikel aufzufinden. Die messtechnische Detektierbarkeit derartiger Störstellen ist jedoch bei Gleichspannung schwieriger [3].

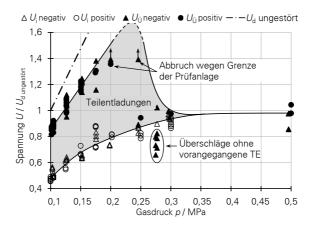


Bild II: Einsetz- und Durchschlagsspannungen bei Gleichspannungsbelastung für ein 8-mm-Partikel in Abhängigkeit vom Gasdruck

- M. Hering, R. Gremaud, J. Speck, S. Großmann, U. Riechert, Flashover Behaviour of Insulators with Inhomogeneous Temperature Distribution in Gas Insulated Systems under DC Voltage Stress. ICHVE, Poznan, 2014.
- [2] M. Hering, J. Speck, S. Großmann, U. Riechert, Investigation of Particles on Insulator Surfaces in Gas Insulated Systems under DC Stress. CEIDP, Des Moines, 2014.
- [3] M. Hering, J. Speck, K. Backhaus, S. Großmann, P. Arnold, U. Riechert, Untersuchungen zur Detektion von festen Störstellen auf Isolatoren in gasisolierten Systemen bei Gleichspannungsbelastung. 6. ETG-Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Berlin, 2014.



Davoud Esmaeil Moghadam, M.Sc.

Spannungsbelastung durch ungleichmäßige Spannungsverteilung in der Statorwicklung von umrichtergespeisten Induktionsmotoren

Veröffentlichungen bezüglich der Ausfallsicherheit von umrichtergespeisten Induktionsmaschinen zeigen, dass die wesentlichen Fehler in Induktionsmotoren durch Schwachstellen und Verschleiß der Isolierung verursacht werden. Daher wurde in der Forschung in den vergangenen fünf Jahrzehnten verstärkt an der Verbesserung der Isolierung gearbeitet.

Neuartige elektronische Hochfrequenzschaltungen führen zu neuen Herausforderungen bezüglich der Nutzung von Umrichtern für das Anlaufen und für die Regelung des Motors. Die Ausgangsspannung der Umrichter besteht aus Impulsen hoher Frequenz und Amplitude mit einer kurzen Anstiegszeit und unterschiedlichen Pulsweiten. Daher ist die Bewertung der dadurch verursachten Effekte in der Statorwicklung notwendig.

Zu diesem Zweck wurde die Spannungsverteilung in der Statorwicklung eines 6 kV Stators mit 15 Wicklungen je Phase in Abhängigkeit verschiedener Pulsweiten und Anstiegszeiten untersucht. Dabei wurden jeweils der Spannungsfall über den einzelnen Spulen und die Amplitude der Spannung gegen Erde untersucht.

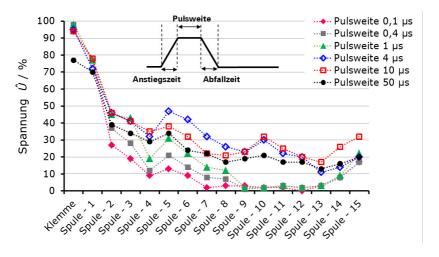


Bild I: Spannungsfall über den einzelnen Spulen (0,4 µs Anstiegszeit)

Im Bild I ist der prozentuale Spannungsfall über den Spulen veranschaulicht. Wie sich dem Bild entnehmen lässt, liegt der Spannungsfall in der ersten Spule bei etwa 80 % der Eingangsspannung und ist nahezu unabhängig von der Pulsweite. Der Spannungsfall über den übrigen Spulen liegt deutlich darunter und entspricht der Spannungsverteilung in einem Niederspannungsmotor. Es wurde festgestellt, dass die Ergebnisse für unterschiedliche Anstiegszeiten  $(0,1~\mu s-4~\mu s)$  das gleiche Muster zeigen.

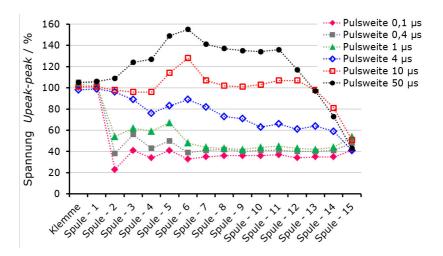


Bild II: Spitze-Spitze-Spannung der Spulen gegen Erde (0,4 µs Anstiegszeit)

Im nächsten Schritt wurde die Spannung gegen Erde innerhalb einer Wicklung in Abhängigkeit verschiedener Pulsweiten untersucht (Bild II). Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Spitze-Spitze-Spannung der Spulen erheblich erhöht, wenn die Pulsweite ansteigt. Es sei jedoch angemerkt, dass verschiedene Wicklungsschemen das Muster verändern könnten. Weitere Untersuchungen haben zudem gezeigt, dass sich für eine Reihe unterschiedlicher Anstiegszeiten (0,1 $\mu$ s –  $4\mu$ s) ähnliche Muster in der Spannungsverteilung ergeben.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Windungsisolierung der ersten Spule mehr als die der anderen Spulen beansprucht wird. Bei großen Pulsweiten können an den mittleren Spulen zum Teil höhere Spannungen gegen Erde als an den Klemmen auftreten und die Hauptisolierung belasten. Diese Beanspruchungen können eine potenzielle Ursache für den Verschleiß der Isolierung sein. Um die Lebensdauer der Isolierung zu optimieren wäre es dementsprechend denkbar kritische Impulse und Spulen zu identifizieren.



Matthias Voigt, Dipl.-Ing.

Entwicklung und Erprobung eines Bohrkopfes auf Basis des Elektro-Impuls-Verfahrens und Untersuchung des Zündverhaltens von Funkenstrecken

Die konventionelle Bohrtechnik stößt bei Tiefenbohrungen in Hartgestein an ihre Grenzen. Der starke Verschleiß der Bohrkrone hat zeitraubende und unproduktive Werkzeugwechsel zur Folge, wodurch Bohrkosten und Bohrdauer stark ansteigen. Die Bohrgeschwindigkeit sinkt für ein 12 ½ Bohrloch durch die Werkzeugwechsel von 1,5 m/h auf effektiv weniger als 1 m/h ab bei einer Standzeit von 50 h.

Mit dem Elektro-Impuls-Verfahren lassen sich Bohrlöcher nahezu verschleißfrei erstellen, wodurch die häufigen Werkzeugwechsel und die damit verbundenen Stillstandzeiten reduziert werden können. Mithilfe eines Generators werden hohe Impulsspannungen erzeugt und zwei auf dem Gestein ruhenden und von Bohrspülung umflossenen Elektroden zugeführt. Bei einer ausreichenden Steilheit der auftretenden Impulse wird Gestein aus der Oberfläche herausgelöst und mithilfe der Bohrspülung abtransportiert. Vorteile dieses Verfahrens sind u.a. der geringe Verschleiß der Bohrelektroden und der geringere Energiebedarf aufgrund unterschiedlicher Wirkmechanismen im Vergleich zum konventionellen Rotary-Bohren. Zudem ist ein Rotieren des Bohrkopfes nicht notwendig. Es wird von einer Standzeit von 500 h ausgegangen.

Es wurde ein zwölfstufiger Impulsspannungsgenerator entwickelt, der Temperaturen von 200 °C standhält und einen Durchmesser von 130 mm bei einer Länge von 6 m aufweist. Dieser Generator wird in einem Gehäuse untergebracht und unter Isoliergas betrieben, so dass er im Bohrloch versenkt werden kann. Mit diesem Generator konnte eine Bohrgeschwindigkeit von mehr als 1 m/h erreicht und ein 50 cm tiefes Bohrloch von 12 ¹/4 " Durchmesser in einem Probekörper aus Granit erstellt werden (Bild I).



Bild I: 12 1/4 " Bohrloch

Für den kontinuierlichen Betrieb des Impulsspannungsgenerators muss ein zuverlässiges Zünden aller zwölf Funkenstrecken gewährleistet sein. Dafür werden geeignete Elektroden hinsichtlich Material, Abbrandfestigkeit, Rauigkeit und Streuung ausgewählt (Bild II). Zudem kann mit einem Netzwerkmodell der Einfluss des Zündverhaltens auf das Gesamtsystem untersucht werden. Nach dem Aufbau des Impulsspannungsgenerators und den erfolg-

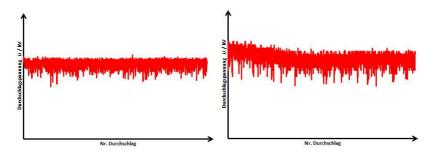


Bild II: Durchschlagspannungen von Wolfram und Edelstahl bei 5000 Impulsen (25 Hz)

reichen Bohrversuchen muss in einem zweiten Schritt die Energieversorgung des Generators entwickelt und realisiert werden, um den Bohrkopf in einem realen Bohrloch einsetzen zu können. Das Konzept (Bild III) sieht eine autarke Lösung vor, bei der mithilfe eines Verdrängungsmotors bzw. einer Turbine Energie dem Spülungsstrom der Bohrspülung im Bohrloch entzogen wird. Über Generator, Getriebe, Transformator und Gleichrichter wird die für die Impulsspannungsquelle notwendige Gleichspannung erzeugt. Diese Komponenten müssen an die Anforderungen in einem Bohrloch angepasst werden.

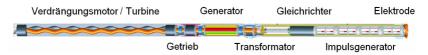


Bild III: Konzept für den EIV-Bohrkopf



Moyan Wei, M.Eng.

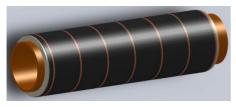
Experimentelle Ermittlung nichtlinearer
Leitfähigkeitskennlinien

Im Wickelkopfbereich der Ständerwicklung rotierender Hochspannungsmaschine befindet sich der Endenglimmschutz (EGS) als Beschichtung an der Wicklungsoberfläche. Der EGS dient dank der feldabhängigen nichtlinearen Leitfähigkeit der Reduzierung der tangentialen elektrischen Feldstärke im Bereich des Nutaustritts. Je nach Beanspruchungsart muss der EGS unterschiedliche Kriterien erfüllen:

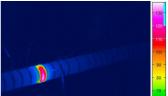
- Während der Hochspannungsprüfung dürfen weder Überschläge noch thermische Überlastungen auftreten.
- Unter Betriebsbedingung müssen Teilentladung (TE) auf den EGS vermieden werden.

Es wurde durch vorherige Arbeit gezeigt, dass diese Beanspruchungen durch Berechnungen der elektrischen Feldstärke und Temperatur vorherzusagen sind. Die Qualität der Vorhersage wird von der genauen Kenntnis der Leitfähigkeitskennlinien bestimmt.

Bisher wurde die Kennlinien mit Gleichspannung (DC) und Wechselspannung (AC) ermittelt. Der zur Messung benötigter Prüfling ist ein vereinfachtes Labormodel einer Ständerwicklung (Bild Ia). Die feldstärkeabhängige Leitfähigkeit wurde durch Spannungs- und Strommessung an benachbarten Messelektroden ermittelt







(b) Eingenerwärmung bei AC

Bild I: Rohrförmiger Prüfling

Es gibt zwei Gründe, dass diese Kennlinie mit Impulsspannung erfasst werden sollten:

Es wurde beobachtet, dass während der DC bzw. AC Messung der Prüfling z. T. erheblich erwärmt worden war (Bild Ib). Es war leider nicht bekannt, wie diese Eigenerwärmung die Leitfähigkeit beeinflusst.

 Die umrichtergespeisten Maschinen werden mit impulsförmiger Spannung beansprucht. Es ist nicht bekannt, ob die DC- bzw. AC-Kennlinien auch für den Umrichterbetrieb gelten.

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wird aufgrund dessen versucht, diese Kennlinien mit Impulsspannung zu ermitteln. Es wurde 2 Impulsformen verwendet. Aufgrund der niedrigen Wiederholungsrate ist bei der Impulsspannung der Energieeintrag und somit die Eigenerwärmung gegenüber DC und AC sehr klein. Eine Herausforderung der Messung mit Impulsspannung ist die Separation des resistiven Anteils vom gesamten Strom, da ein großer kapazitiver Ladestrom nicht zu vermeiden ist. Die Impulskennlinien zeigt gegenüber den AC-Kennlinien eine viel höhere Leitfähigkeit im Bereich hoher Feldstärke (Bild II). Zum Vergleich wurde der Prüfling künstlich auf hohe Temperatur geheizt und gleichzeitig gemessen. Das Messergebnis zeigt eine starke Senkung der Leitfähigkeit. Die Impulskennlinien eines geheizten Prüflings liegen im selben Bereich wie bei AC und DC.

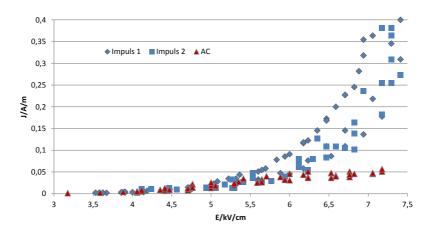


Bild II: Vergleich gemessener Leitfähigkeitskennlinien: AC vs. Impuls

Durch Experimente wurde bestätigt, dass:

- kein prinzipieller Unterschied des Leitungsmechanismus bei AC, DC und Impulsspannung auftritt
- die Eigenerwärmung des Prüflings bei AC und DC die Senkung der Leitfähigkeit hervorruft.

## Projekt zum Forschungsschwerpunkt "Arbeiten unter Spannung"



Hans-Peter Pampel, Dipl.-Ing.

Untersuchungen zur Entladungsbeständigkeit von Kunststoffseilen

Kunststoffseile sind als isolierende Seile ein unerlässliches Arbeitsmittel zum Arbeiten unter Spannung (AuS). Von besonderem Interesse sind bei elektrischer Prüfung und dem Einsatz Vorgänge, die nach Belastung mit Nässe und den daraus resultierenden Ableitströmen die elektrische und mechanische Festigkeit der Seile mindern. Erwärmen sich im Seil durchgängige Wasserbahnen bis zum Verdampfen des Wassers, erfolgt nach zunächst gleichmäßiger starker thermischer Beanspruchung ein Aufreißen der Wasserbahn. An den sich dabei bildenden Längsgrenzflächen Kunststofffaser-Gasblase wiesen Untersuchungen an einzelnen Kapillaren zündende und verlöschende Entladungen und daraus resultierend eine örtlich begrenzte thermische Beanspruchung nach. Im Bereich der Gasblasen traten dabei auf die Länge der Gasblasen bezogene Verlustleistungen kleiner 100 mW/mm auf. Ein Festigkeitsverlust des Kunststoffes ist bei diesen Vorgängen wahrscheinlich, lässt sich jedoch, insbesondere für den beschriebenen Fall zündender und verlöschender Entladungen an den Grenzflächen, noch nicht quantifizieren.





(a) Test entsprechend DIN EN 61621

(b) angepasster Test

Bild I: Polypropylenseil - stabiler Lichtbogen

Versuche an Kunststoffseilen aus Polypropylen mit dem eingeführten Verfahren zur Prüfung der Lichtbogenbeständigkeit von festen Isolierstoffen bei hohen Spannungen und niedrigen Strömen entsprechend DIN EN 61621 [1] zeigten bereits in der geringsten Belastungsstufe 10 mA erhebliche Aufschmelzungen des Kunststoffes. Verbunden damit waren eine Verlängerung der Lichtbogenstrecke durch das Absinken der Prüfelektroden (Bild Ia). Auf Grund des trotzdem zwischen den Elektroden weiter brennenden stabilen Lichtbogens,

konnte ein Ausfall des Prüfobjektes entsprechend der in DIN EN 61621 festgelegten Ausfallkriterien nicht klar bestimmt werden.

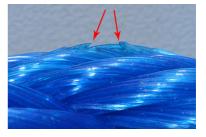
Zur Untersuchung der Festigkeit von Kunststoffseilen bei Belastung mit zündenden und verlöschenden Entladungen an Grenzflächen waren die Anordnung sowie das Verfahren zur Prüfung der Lichtbogenbeständigkeit bei hohen Spannungen und niedrigen Strömen deshalb folgendermaßen anzupassen:

- Fixierung der Elektroden sowie Aufbringen und Einstellen der Anpresskraft über den Prüfobjekttisch von unten
- Verringerung der Belastung bis zu einer auf die Entladungslänge bezogenen Entladungsleistung von 100 mW/mm
- Erweiterung der Ausfallkriterien

Ein stabiler Lichtbogen auf Kunststoffseilen ist bei 3 mA bis zu einer minimalen bezogenen Entladungsleistung von ca. 800 mW/mm (Bild Ib) erzeugbar. Geringere Entladungsleistungen sind lediglich mit periodisch zündendenden Entladungsimpulsen realisierbar.

Untersuchungen an Seilen aus Polypropylen mit einer Belastung von ca. 500 mW/mm mittels 11 ... 13 Impulsen pro Periode der Prüfspannung führten nach ca. 12 s zu einem stabilen Lichtbogen mit entsprechend starker Aufschmelzung des Kunststoffes (Bild IIa). Eine Belastung baugleicher Seile mit ca. 100 mW/mm (1 ... 2 Impulse pro Periode) zeigte nach 5 min ein Anschmelzen von Faseroberflächen und nach 120 min ein Durchschmelzen einzelner Fasern (Bild IIb).





(a) 500 mW/mm, 1 min

(b) 100 mW/mm, 120 min

Bild II: Polypropylenseil - Entladungsimpulse

Daraus abgeleitet werden

- die Lichtbogeneinsatzzeit
- die Anzahl getrennter Fasern oder
- die Anzahl geschädigter Fasern

als mögliche erweiterte Ausfallkriterien definiert.

Fortführende Untersuchungen der Entladungsbeständigkeit von ausgewählten Kunststoffseilen sollen die definierten Ausfallkriterien präzisieren bzw. ergänzen und zur Beurteilung des Festigkeitsverlustes der Seile herangezogen werden

[1] DIN EN 61621 (IEC 61621:1997), Trockene, feste Isolierstoffe Prüfung der Lichtbogenbeständigkeit bei hoher Spannung und niedrigem Strom.

## Projekte zum Forschungsschwerpunkt "Strombelastbarkeit und Erwärmung"



Maher Bakka, M.Eng.

Berechnung der elektromagnetischen Feldverteilungen für die verschiedenen Leiterseilanordnungen an Kompaktmasten

Um auf gleich bleibenden Trassen immer mehr Elektroenergie über weite Entfernungen transportieren zu können, sollten bei einem Neubau z.B. Betonmasten in Kompaktbauweise eingesetzt werden.

Auf Grund der zu befürchtenden gesundheitlichen Risiken für Menschen und Tiere, sowie der Beeinflussung benachbarter elektronischer Systeme (elektromagnetische Verträglichkeit: EMV) dürfen die elektromagnetischen Felder einer Freileitung die jeweiligen maximal zulässigen Grenzwerte nicht überschreiten. Als Randbedingung sind die maximalen elektrischen Belastungen der Freileitung (Strom und Spannung) sowie die verschiedenen Varianten der Leiteranordnung( $\vartheta, \eta, \xi$ , usw.) zu berücksichtigen. Die elektrische Feldstärke und die magnetische Flussdichte (Bild I) sind am tiefsten Punkt der Freileitung, in der Spannfeldmitte, in 1 m Höhe über dem Boden, zu beurteilen. Ziel dabei ist es nicht nur den Nachweis zur Einhaltung der gesetzlich geforderten Grenzwerte zu erbringen, sondern auch Vorschläge zur weiteren Reduzierung der elektromagnetischen Feldgrößen zu unterbreiten.

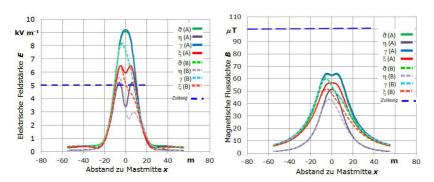


Bild I: Elektrische Feldstärke und magnetische Flussdichte berechnet für die verschiedenen Anordnungen der Leiterseile mit den Varianten A & B des Kompaktmastes

Als Referenz werden die elektromagnetischen Feldverteilungen in Bodennähe für die Stahlgittermasten der Typen Tonne und Donau berechnet. Von den 21 möglichen Leiteranordnungen am Betonmast in Kompaktbauweise

werden nur in 12 Fällen z. B.  $(\eta, \xi)$  die Grenzwerte eingehalten (Bild I). Mit den vorgegebenen Varianten des Kompaktmastes ist es nicht möglich die Grenzwerte für die elektromagnetischen Felder in Bodennähe bei allen Leiteranordnungen einzuhalten. Die Feldstärken in Bodennähe können jedoch durch einen größeren Abstand der Leiterseile zum Boden verkleinert werden (Tabelle I).

Um auch den Grenzwert der elektrischen Feldstärke (5 kV/m, Tabelle I) für die Variante A des Kompaktmastes bei  $\gamma$ -Anordnung einzuhalten, muss der Abstand der Leiterseile zum Boden von 10,32 m auf 16,82 m vergrößert werden. Für die  $\xi$ -Anordnung ist der Abstand von 10,32 m nur auf 12,5 m zu erhöhen

Die Grenzwerte für die magnetische Flussdichte ( $100\,\mu T$ ) werden bereits beim Abstand von  $10,32\,m$  eingehalten. Für die optimierten Abstände ist die magnetische Flussdichte noch geringer.

Tabelle I: An verschiedenen Varianten von Kompaktmasten berechnete Feldstärken in Bodennähe bei unterschiedlichen Leiteranordnungen

	Leiter-	momentan		optimiert	
	anordnung	Α	В	Α	В
Abstand zum	$\gamma$	10,32	10,32	16,82	15,42
Boden S <sub>min</sub> /m	ξ	10,32	10,32	12,5	12,37
Ê in kV/m	$\gamma$	9,2	8,21	5	
	ξ	6,54	6,5		
B̂ in mT	$\gamma$	64,5	61,2	37,1	37,4
	ξ	56,8	52	44,5	41,1

<sup>[1]</sup> Peter Bauhofer: Handbuch für Hochspannungsleitungen – niederfrequente elektromagnetische Felder und deren wirksame Reduktion, Verband der Elektrizitätswerke Österreichs (VEÖ), Wien 1994.

<sup>[2]</sup> Friedrich Kießling, Peter Nefzger, Ulf Kaintzyk: Freileitungen - Planung, Berechnung, Ausführung; [nach EN 50341] 5., vollständig neu bearbeitete Auflage, Springer Berlin; Heidelberg [u.a.], 2001.



Melanie Gründel, Dipl.-Ing.

Thermische Untersuchungen an ölisolierten Komponenten

In Hochspannungsprüftransformatoren (Bild I) und -drosseln stellen die stromdurchflossenen Lagenwicklungen das thermisch empfindlichste Bauteil dar. Diese Wicklungen werden aufgrund des erforderlichen Aktivteilaufbaus waagerecht auf dem Eisenkern angeordnet. Aus diesem Aufbau resultieren horizontale ausgerichtete Kühlkanäle in der Wicklung.

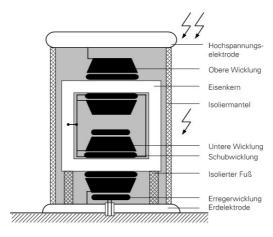


Bild I: Hochspannungsprüftransformator in Isoliermantelbauweise mit Eisenkern auf halbem Hochspannungspotential

Um das gesamte Gerät thermisch zu bewerten, kann ein Wärmenetz aufgestellt werden (Bild II), welches es erlaubt die Komponenten und ihre Wärmeübergänge zu modularisieren. Dazu gehören der Eisenkern, die verschiedenen Wicklungen, das Isolieröl, das Gehäuse und die Umgebungsluft.

Dabei steht die thermische Beschreibung der Wicklung im Mittelpunkt der Untersuchungen. Zwischen den einzelnen Wicklungsblöcken einer gesamten Wicklung befinden sich Distanzleisten, welche gleichmäßig am Umfang verteilt sind und damit die Kühlkanäle bilden. Diese haben die Aufgabe, die Verlustwärme der Wicklung an das umströmende Isolieröl abzuführen. In experimentellen Untersuchungen wurden Beschreibungsformen zum Wärmeübergang zwischen Wicklung und Öl erarbeitet. Dabei zeigte die Beschreibungsform nach Incropera [1] (Gleichung (1)) äußerst praxisnahe Ergebnisse.

$$Nu = c \cdot Re^{n} \cdot Gr^{m} \cdot Pr_{f}^{o} \cdot \left(\frac{Pr_{f}}{Pr_{W}}\right)^{p} \tag{1}$$

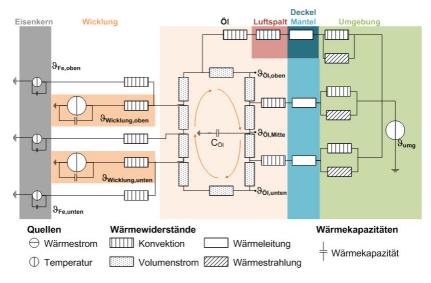


Bild II: Vereinfachtes Wärmenetz eines Hochspannungsprüftransformators

An vereinfachten Modellen mit nur einem Kühlkanal und komplexen Wicklungen mit mehreren Kühlkanälen wurden Empfehlungen zur praktischen Dimensionierung und Wärmenetzerstellung von ölisolierten Geräten mit waagerechten Wicklungen gegeben.

Im Allgemeinen gilt, dass der Wärmeübergang in senkrechten Kühlkanälen größer ist als in horizontalen Kühlkanälen, da dieser stark von der Strömungsgeschwindigkeit des Isolieröls abhängt. In horizontalen Kühlkanälen liegt diese Strömungsgeschwindigkeit bei natürlicher Konvektion im Bereich weniger mm/s. Eine Geschwindigkeitsbestimmung ist in der Praxis nicht möglich. Darum müssen unter Berücksichtigung der Randbedingungen der Temperatur und Leistungseinspeisung Berechnungen zur Bestimmung durchgeführt werden. Hier ist unter anderem die Berechnung über die Finite-Elemente-Methode oder über die Volumenstrommethode (siehe auch [2]) möglich.

- [1] Incropera, F., De Witt, D.P.: Fundamentals of Heat and Mass Transfer; 3. Auflage; Verlag John Wiley & Sons; New York; 1990
- [2] Schenk, M.: Thermische Bemessung von Netzstationen; 1. Ausgabe; VWEW Energieverlag GmbH; Frankfurt a.M.; 2003

### 3.2.2 Publikationen

### Vorträge

Bäuml, K.:

Superconducting Fault Current Limiter - Smart Solution Enabler for Networks. ICSM 2014 - Internation Conference on Superconductivity and Magnetism

Antalya, Türkei, 29.04.2014

Hering, M.:

Investigation of the Temperature Influence on the Breakdown Voltage in GIS under DC Voltage Stress. Workshop "Gas-Insulated HVDC Components: New Challenges for Materials, Testing and Diagnostics", CIGRÉ Advisory Group D1.03,

Graz, Österreich, 26.05.2014

Hering, M.:

Gas Breakdown and Insulator Flashover due to High Temperatures in GIS under DC Voltage Stress. CIGRÉ Joint Working Group D1/B3.57,

Graz, Österreich, 27.05.2014

Hering, M.:

Faszination Hochspannungstechnik. Tag der Wissenschaften, Meißen, 10.04.2014

Hering, M.:

Forschungsgebiet Hochspannungstechnik - Einblicke in die Praxis. UNI LIVE Schnupperstudium,

Dresden, 09.01.2014

Anders, E., Voigt, M.:

Elektroimpulsbohren für Tiefengeothermie, Geothermiekongress 2014, Essen. 11.-13. November 2014

Pfeifer, S.:

Elektrische Kontakte und Verbindungen mit Leitern aus Aluminium und Kupfer - Langzeitverhalten und Alterung. Arbeitskreis 431.0.9 Geräteanschlüsse/Klemmen.

Erfurt, 04.09.2014

#### Poster

Lehmann, F., Anders, E., Voigt, M.:

Electric Impulse Technology - Long Run Drilling in Hard Rocks. SPE Aberdeen Summit Series Seminar - Drilling Automation,

Aberdeen, Schottland, 02.10.2014

### Veröffentlichungen

Backhaus, K.; Speck, J.; Hering, M.; Fritsche, R.; Großmann, S.:

Nonlinear dielectric Behavior of Insultation Oil under HVDC Stress as a Result of Ion Drift. International Conference on High Voltage Engineering and Application,

Poznan, Polen, 2014

Gatzsche, M.; Lücke, N.; Großmann, S.; Ledermann, T.; Freudiger, G.: Impact of the Temperature-Induced Reduction of Joint Force on the Long-Term Behavior of Contact Elements with Material-Allocated Electrical and Mechanical Function. 27th International Conference on Electrical Contacts, Dresden. 2014

Gatzsche, M.; Lücke, N.; Großmann, S.; Kufner, T.; Hagen, B.; Freudiger, G.:

Electric-Thermal Performance of Contact Elements in High Power Plug-In Connections. 60th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts,

New Orleans, USA, 2014

Bäuml, K.; Ramonat, A.; Großmann, S.:

Electrical and thermal behaviour of electrical joints with normal- and superconducting materials at low temperatures. 27th International Conference on Electrical Contacts,

Dresden, 2014

Hering, M.; Speck, J.; Großmann, S.; Riechert, U.:

Investigation of Particles on Insulator Surfaces in Gas Insulated Systems under DC Stress. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena,

Des Moines, USA, 2014

Hering, M.; Gremaud, R.; Speck, J.; Großmann, S.; Riechert, U.:

Flashover Behaviour of Insulators with Inhomogeneous Temperature Distribution in Gas Insulated Systems under DC Voltage Stress. International Conference on High Voltage Engineering and Application,

Poznan, Polen, 2014

Hering, M.; Speck, J.; Backhaus, K.; Großmann, S.; Arnold, P.; Riechert, U.: *Untersuchungen zur Detektion von festen Störstellen auf Isolatoren in gasisolierten Systemen bei Gleichspannungsbelastung.* 6. ETG-Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel,

Berlin, 2014

Arnold, P.; Tenbohlen, S.; Hering, M.; Riechert, U.:

Detektion freibeweglicher, leitfähiger Partikel in SF6 unter Gleichspannung. 6. ETG-Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Berlin. 2014

Arnold, P.; Hering, M.; Tenbohlen, S.; Köhler, W.; Riechert, U.; Straumann, U.:

Discharge Phenomena at Partially Damaged Dielectric Coatings in SF6-insulated Systems at AC and DC Stress. 20th International Conference on Gas Discharges and their Applications,

Orleans, USA, 2014

Hildmann, C.; Großmann, S.; Dockhorn, T.:

The initial contact stress in aluminum compression connections with high temperature low sag conductors. 27th International Conference on Electrical Contacts.

Dresden, 2014

Dreier, S., Lücke, N., Großmann, S.:

Long Term Behavior of Electrical Contacts with Crossed Rods under Various Environmental Conditions. 27th International Conference on Electrical Contacts,

Dresden, 2014

Schlegel, S., Großmann, S., Johne, V., Füssel, U.:

Elektrisches Eigenschaftsprofil von Schraubenverbindungen – Anforderungen im Bereich E-Mobilität Elektrische Kontakte und Verbindungen, Kurzund Langzeitverhalten. 11. Workshop Industrielle Schraubmontage,

Dresden, 01.10.2014

### Schlegel, S.:

Langzeitverhalten ruhender elektrischer Verbindungen – Anforderungen, Grenztemperaturen, Prüfung. 1. Wissenschaftliches Kolloquium im Rahmen der B&E-Veranstaltungsreihe,

Schkopau, 18.09.2014

Großmann, S., Schlegel, S.:

Ruhende elektrische Verbindungen in der Elektroenergietechnik. ETG-Mitgliederinformation,

2014

Lehmann, F.; Anders, E.; Voigt, M.; Reich, M.; Kunze, G.:

Granit unter Hochspannung - Das Elektro-Impuls-Verfahren in der Laborerprobung. DGMK/ÖGEW-Frühjahrstagung,

Celle, 24./25.04.2014

Lehmann, F., Anders, E., Voigt, M., Reich, M., Kunze, G.:

Electric Impulse Technology - Long Run Drilling in Hard Rocks, Celle Drilling 2014.

Celle, 15./16.09.2014

Fuhrmann, T.; Schlegel, S.; Großmann, S.; Hoidis, M.:

Comparison between nickel and silver as coating materials of conductors made of copper or aluminum used in electric power engineering. 27th International Conference on Electrical Contacts,

Dresden, 2014

Fuhrmann, T.; Schlegel, S.; Großmann, S.; Hoidis, M.:

Investigations on stationary electrical joints with a bare and a silver or nickel coated contact partner regarding the permissible temperature limit according to ANSI IEEE and IEC. 60th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts.

New Orleans, USA, 2014

Pfeifer, S.; Großmann, S.; Willing, H.; Kappl, H.:

Characterization of Intermetallic Compounds in Al-Ag Bimetallic Interfaces. 27th International Conference on Electrical Contacts.

Dresden, 2014

Pampel, H.-P.:

Electrical Behavior of Insulating Ropes for Live Working. 11th International Conference on Live Maintenance,

Budapest, Ungarn, 2014

Esmaeil Moghadam, D; Shiri, A; Sadr, S; Khabouri, D:

A Practical Method for Calculation of Overexcited Region in the Synchronous Generator Capability Curves. 23rd IEEE International Symposium on Industrial Electronics (IEEE ISIE),

Istanbul, Türkei, Juni 2014

Sadr, S; Khabouri, D; Esmaeil Moghadam, D; Shiri, A.:

Modeling of Wheel and Rail Slip and Demonstration the Benefit of Maximum Adhesion Control in Train Propulsion System. 23rd IEEE International Symposium on Industrial Electronics (IEEE ISIE),

Istanbul, Türkei, Juni 2014

Kaufmann, B., Kurzweil, F., Heger, J., Adam, R.:

Developement of an Heating System for Hollow Sleepers containing Points Positioning Systems, 3rd International Conference on Road and Rail Infrastructure,

Split, Kroatien, 28.-30.04.2014

## 3.3 Preise und Auszeichnungen

#### "Hans-Pundt-Preis 2013"

Mit dem Hans-Pundt-Preis möchte der VDE hervorragende Leistungen auf technisch-wissenschaftlichem Gebiet anerkennen und ein Zeichen für die gesellschaftliche Bedeutung von Ingenieuren und ihrer Arbeit setzen.

In Dresden wurden am 12.02.2014 auf der Jahresmitgliederverammlung Herr Alexander Ramonat und Herr Christian Kühnel mit dem Hans-Pundt-Preis 2013 für Ihre Diplomarbeiten "Thermisches Verhalten von Leiterwerkstoffen bei tiefen Temperaturen abhängig von der Strombelastung" und "Funktion von Schmelzsicherungen bei hoher thermischer Belastung" ausgezeichnet. Wir gratulieren recht herzlich.

### "VDE/ETG-Literaturpreis 2014"

Jährlich werden mit dem VDE/ETG-Literaturpreis hervorragende Veröffentlichungen auf dem Gebiet der elektrischen Energietechnik ausgezeichnet. In Leipzig wurden am 01.10.2014 auf der 12. CIGRE/CIRED-Informationsveranstaltung Herr Benjamin Kaufmann und Herr Sebastian Dreier neben anderen Preisträgern gemeinsam mit dem VDE/ETG-Literaturpreis 2014 ausgezeichnet

Der Vorsitzende der ETG, Herr Dr. Rainer Speh, überreichte den gmeinsamen Preis für die Veröffentlichung "Integration of LN<sub>2</sub> Multiphase Heat Transfer Into Thermal Networks for High Current Component". Wir gratulieren recht herzlich.



Übergabe des Hans-Pundt-Preises Foto: Günter Herbrich



Übergabe des VDE/ETG-Preises Foto: Kai Schlossig

#### 3.4 Promotionen



Thomas Jordan, Dr.-Ing.

Zum dielektrischen Verhalten von AuS-relevanten Mehrelektroden-Anordnungen in der Mittelspannung und deren sicherheitstechnische Bewertung

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann – TU Dresden Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schufft – TU Chemnitz

Beim Einsatz eines Überbrückungssystems in unter Spannung stehenden Mittelspannungs-(MS)-Innenraum-Anlagen werden die Komponenten des Systems in spezifischer Art und Weise dielektrisch, thermisch und mechanisch beansprucht. Eine sichere Anwendung des Systems kann nur bei genauer Kenntnis der einzelnen Beanspruchungen und dementsprechender Dimensionierung und Gestaltung der Komponenten erfolgen.

In der vorliegenden Arbeit wurde auf den Anschluss des Überbrückungssystems unter Spannung und die dabei entstehenden Mehrelektroden-Anordnungen eingegangen. Ein Ziel der Untersuchungen war die sicherheitstechnische Bewertung der Montagetechnologie der Trossenleitungen des Überbrückungssystems. Als Bewertungskriterium dient die ereignisorientierte Gefährdungswahrscheinlichkeit, die auf der Grundlage von in Langzeitmessungen gewonnenen statistischen Daten zur Überspannungsbeanspruchung in MS-Anlagen und zum Isoliervermögen der AuS-relevanten Elektrodenanordnungen berechnet wurde.

Ein weiteres Ziel der Untersuchungen war die Beschreibung des Entladungsverhaltens von Mehrelektroden-Anordnungen mit Elektrodenabständen im Zentimeter-Bereich, wie sie beim Arbeiten unter Spannung (AuS) in MS-Innenraum-Anlagen vorkommen.

Voruntersuchungen an Mehrelektroden-Anordnungen (Dreielektroden-Anordnungen im Abstandsbereich zwischen 10 cm und 30 cm) zeigten eine deutliche Abhängigkeit der Durchschlagwechselspannung von der Position der auf freiem Potential befindlichen Zwischenelektrode (ZWE) zwischen den äußeren Elektroden (HE, EE). Die minimale Durchschlagwechselspannung wird für die Position erreicht, bei der sich die ZWE in unmittelbarer Nähe zur Hochspannungselektrode (HE) befindet, ohne diese zu berühren (kritische Position der ZWE). Berührt die ZWE die HE steigt die Durchschlagspannung wieder an. In beiden Fällen ist die resultierende Luftfunkenstrecke aber gleich groß. Dieser Effekt wurde näher untersucht.

Mit Hilfe von optischen Teilentladungsmessungen konnten die auftretenden Entladungsarten sichtbar gemacht werden. Dabei konnte ein Spalt-Effekt identifiziert werden. Mit dem *Spalt-Effekt* kann der signifikante Unterschied der Durchschlagspannungen von Zweielektroden-Anordnungen und Mehrelektro-

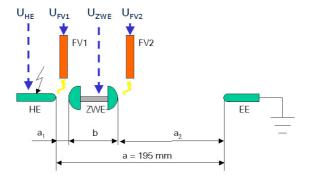


Bild I: Schematischer Aufbau der Versuchsanordnung

den-Anordnungen (mit der ZWE in der kritischen Position) bei gleicher zur Verfügung stehenden Restluftstrecke durch das Auftreten unterschiedlicher Entladungsarten erklärt werden.

Es wurde gezeigt, dass für Mehrelektroden-Anordnungen mit ZWE in der kritischen Position (Anordnung 2) sofort weit reichende *Streamerentladungen* auftreten, während in Zweielektroden-Anordnungen (Anordnung 1) *Glimmentladungen* zu einer Erhöhung der Durchschlagspannung führen. Die auftretenden Streamerentladungen in den Mehrelektroden-Anordnungen wurden als *Ausbruchsentladungen* identifiziert.





Bild II: Vorentladung Anordnung 1

Bild III: Vorentladung Anordnung 2

Durch den Nachweis der Analogie zwischen dem Ersatzschaltbild einer Mehrelektroden-Anordnungen und dem von inneren Teilentladungen kann zur Berechnung der in den Teilfunkenstrecken von Mehrelektroden-Anordnungen umgesetzten Ladungsmengen und Entladungsströme auf die Beziehungen, die für innere Teilentladungen gelten, zurückgegriffen werden.

Im Ergebnis der Untersuchungen konnte ein mobiles Überbrückungssystem für MS-Innenraum-Schaltanlagen zur Marktreife entwickelt werden.



Nils Lücke, Dr.-Ing.

Zum Langzeitverhalten elektrischer
Steckverbindungen mit
Kupfer-Beryllium-Kontaktlamellen

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann – TU Dresden Prof. Dr.-Ing. Thomas Schoenemann – Uni Rostock

Elektrische Steckverbindungen im Bereich der Elektroenergietechnik werden durch den Betriebsstrom, die daraus resultierende Belastungstemperatur, die Umgebungsbedingungen und durch Relativbewegungen zwischen den Kontaktpartnern belastet. Daraus resultieren verschiedene Alterungsmechanismen, die das Langzeitverhalten der elektrischen Verbindungen wesentlich bestimmen. Mit der Zeit kann der Verbindungswiderstand größer werden, bis es schließlich zum Ausfall der Verbindung kommt. Bekannte Alterungsmechanismen sind: Kraftabbau, Reibverschleiß, Chemische Reaktionen, Elektromigration und Interdiffusion.

Das Langzeitverhalten abhängig von den Mechanismen Kraftabbau und Reibverschleiß wurde in dieser Arbeit anhand von elektrischen Verbindungen mit Kontaktlamellen des Typs LAIA untersucht. Diese Kontaktlamellen bestehen aus einer ausscheidungsgehärteten Kupfer-Beryllium-Legierung (CuBe<sub>2</sub>), die eine hohe mechanische Festigkeit und sehr gute Federeigenschaften bei guter elektrischer Leitfähigkeit auszeichnet

Durch Langzeitversuche mit Modellanordnungen und Berechnungen mit dem FEM-Programm ANSYS wurde die relaxationsbedingte Alterung elektrischer Verbindungen mit CuBe2-Kontaktlamellen abhängig von der Temperatur und der Zeit untersucht. Das für die Berechnung des spannungsrelaxationsbedingten Kraftabbaus erforderliche FEM-Modell wurde durch gemessene Kraft-Weg-Kennlinien verifiziert. Im FEM-Modell können unterschiedliche Randbedingungen in Bezug auf Reibung und Eigenschaften der Kontaktträger berücksichtigt werden. Damit ist es möglich, die verschiedensten praktischen Einsatzfälle der Kontaktlamelle nachzubilden.

Mit der FE-Methode wurde die Abnahme der Verbindungskraft abhängig von der Anfangskraft und der Zeit bei den Temperaturen 90 °C und 115 °C für die Kontaktlamelle LAIA berechnet. Im Vergleich dazu wurden auf Grundlage der Messergebnisse aus den Langzeitversuchen die zeit- und temperaturabhängigen Verbindungskräfte auch mit der Extrapolationsmethode nach Larson und Miller bestimmt und mit den Ergebnissen der FEM-Berechnungen verglichen (Bild I). Beide Verfahren zeigen im experimentell untersuchten Zeitbereich gute Ergebnisse; für große Zeiten ergeben sich jedoch Unterschiede. Die in den Langzeitversuchen gemessenen Verbindungswiderstände nehmen nach der für versilberte Verbindungsflächen typischen Formierungsphase einen stabilen Wert an.

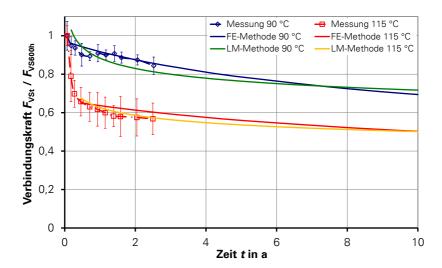


Bild I: Vergleich gemessener und berechneter Verbindungskräfte nach der FE-Methode und der Extrapolation nach Larson und Miller (LAIA/0.15)

Die Untersuchungen zum Reibverschleiß wurden mit einer Versuchsanordnung durchgeführt, mit der Versatzbewegungen bis zu 10 mm und Frequenzen bis zu 100 Hz durch eine digitale Regelung eingestellt werden können. Gegenstand der Untersuchungen war ein praktisch eingesetzter Hochstrom-Steckverbinder mit einer Kontaktlamelle des Typs LAIA. In den experimentellen Untersuchungen wurden, neben dem Parameter Kontaktfett, unterschiedliche Versatzamplituden und –frequenzen als Randbedingungen gewählt.

Es konnte festgestellt werden, dass besonders die Verschleißmechanismen Adhäsion und Abrasion zur Alterung der Kontaktbereiche geführt haben. Welcher dieser beiden Mechanismen dominant ist, hängt, neben der Vorbehandlung der Kontaktflächen mit Kontaktfett, vor allem davon ab, wie sich der Zustand der Kontaktflächen zum betrachteten Zeitpunkt darstellt. Durch Oberflächenanalysen der untersuchten Steckverbinder mit einem optischen 3D-Mikroskop konnten die jeweils dominierenden Verschleißmechanismen nachgewiesen werden.

Prinzipiell ist ein erfolgreicher Einsatz von Kontaktlamellen in einem weiten Anwendungsbereich möglich. Durch Anwenden der in dieser Arbeit beschriebenen Erkenntnisse und Berechnungsmodelle können elektrische Verbindungen mit Kontaktlamellen zukünftig noch besser für große Belastungen ausgelegt werden.

## 4 Kooperationen

## 4.1 Wissenschaftskooperationen

Aalto University/Finnland CEN SIPAM-Centro Gestor e Operacional do Sistema de Protecao da Amazonia, Brasilien

DAMASCUS UNIVERSITY

ETH Zürich

fem Forschungsinstitut Edelmetalle & Metallchemie Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Helsinki University of Technology

Hochschule Zittau/Görlitz

HTW Dresden

HTW Saarland, Saarbrücken

HTWK Leipzig

INP Greifswald e.V.

MIKES. Finnland

MPEI Moskau Russland

Otto-von-Guericke-Universität Maadeburg

Port Said University- Electrical Engineering Department, Ägypten

RWTH Aachen

Suez Canal University-Faculty of Engineering-Electrical Department, Ägypten

Technische Universität Berlin

Technische Universität Braunschweig

Technische Universität Chemnitz

Technische Universität Darmstadt

Technische Universität Graz/Österreich

Technische Universität Ilmenau

Technische Universität München

Technische Universität Wien/Österreich

Tishreen University Lattakia- Fac. of Mechanical & Electrical Engineering, Syrien UFPA-Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará - Faculdade

Engenharia Elétrica, Brasilien

Universität Dortmund

Universität Duisburg-Essen, Campus Duisburg

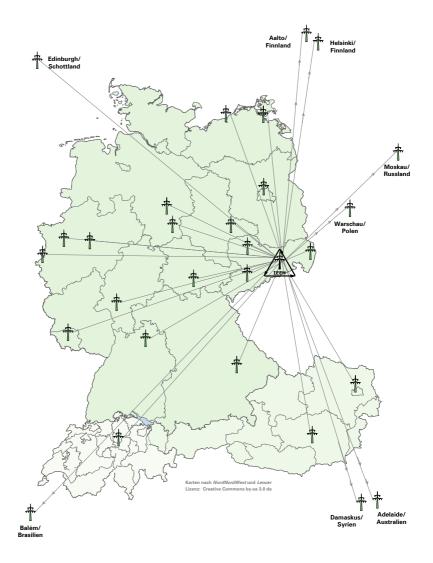
University of Edinburgh

Universität Rostock

Universität Siegen

Universität Stuttgart

Wroclaw University of Technology/Polen



## 4.2 Industriekooperationen

50Hertz Transmission GmbH ABB Asea Brown Boveri Ltd Alcan Singen GmbH und CO. KG Alexander Binzel Schweisstechnik

GmbH & Co. KG ALSTOM Grid

Amprion GmbH

AREVA Energietechnik GmbH

ASBESCO (INDIA) PVT. LTD.

Betonbau GmbH BSD Bildungs- und Servicezentrum GmbH

Cellpack GmbH

Dehn & Söhne GmbH

DNV GL Energy

Doble Lemke GmbH

DREWAG Stadtwerke Dresden GmbH

E.ON Avacon

E.ON Bayern AG

E.ON edis AG

ELECTRONICON Kondensatoren GmbH

Elektrokeramik Sonneberg GmbH EnBW Energie Baden-Würtemberg AG

EnBW Regional AG

ENSO Energie Sachsen Ost AG envia Mitteldeutsche Energie AG ESA Elektroschaltanlagen Grimma

GmbH

Europoles GmbH & Co. KG

FEAG GmbH

fuseXpert

**GWT-TUD** 

HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH ivis ambh

Jean Müller GmbH

Lanz Oensingen AG

LAPP Insulator GmbH LTB Leitungsbau GmbH

Maschinenfabrik Reinhausen

MERSEN Deutschland FFM AG

MITNETZ STROM

Multi-Contact AG

Neldner Consult

Nexans Power Accessories Germany GmbH

NH-HH-Recylingverein

Omicron electronics GmbH

PARTZSCH Elektromotoren e. K

Pfiffner Messwandler AG

PPC Insulators GmbH

Ribe-SubCon GmbH

Richard Bergner Elektroarmaturen GmbH & Co. KG

Ritz International

RITZ Instrument Transformers GmbH

Robert Bosch GmbH

**RWE AG** 

Scheidt GmbH & Co KG

Schneider Electric GmbH

SGS Société Générale de Surveillance Holding (Deutschland) GmbH

Siemens AG

SMA Technologie GmbH

SMT & HYBRID GmbH

Stadtwerke Oranienburg

ThyssenKrupp Aufzüge GmbH

TÜV Süddeutschland Holding AG

Vattenfall Europe Distribution GmbH

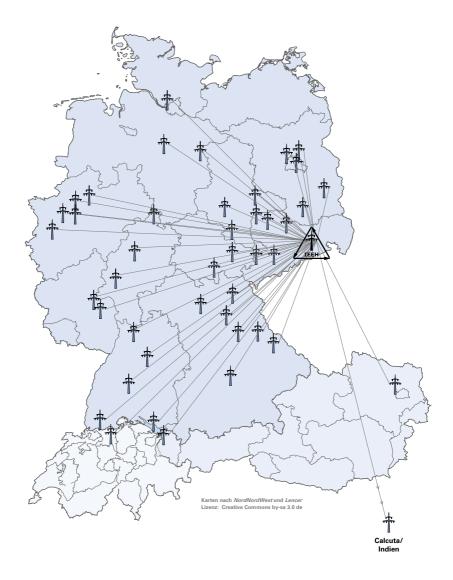
citiali Europe Distribution diffisi

VEM motors GmbH

VFM Sachsenwerk GmbH

Werner Industrielle Elektronik - Werner GmbH

Witthinrich GmbH



#### 4.3 Kommissions- und Gremienarbeit

### 4.3.1 Lehrstuhl Elektroenergieversorgung

Dozent Dr.-Ing. Hartmut Bauer

- VDE-Ausschuss Sicherheits- und Unfallforschung (stv. Obmann)
- VDE Dresden Geschichte der Elektrotechnik (Vorsitzender, seit 20.03.2014),
- VDE-Arbeitskreis Schutz- und Automatisierungstechnik (bis 23.1.2014).
- VDE Dresden Arbeitskreis: Koordination der Isolation

#### Dipl.-Ing. Jörg Dickert

- VDE Task Force Grundsätzliche Auslegung Neuer Netze
- VDE Dresden Arbeitskreis: Verteilungsnetze

#### Dr.-Ing. Jan Meyer

- VDE Dresden Arbeitskreis: Netzrückwirkungen
- DK CIRED und CIRED Session Advisory Group (Session 2)
- CIGRE Working Group C4.112 Guidelines for Power quality monitoring measurement locations, processing and presentation of data
- VDE/FNN Expertennetzwerk Netzrückwirkungen
- D-A-CH-CZ Arbeitsgruppe EMV (Techniche Regeln zur Beurteilung von Netzrückwirkungen)
- DKE/UK 767.1 "Niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen" (Gastmitalied)
- CENELEC SC205A TF EMI "Electromagnetic Interferences between Electrical Equipment/Systems in the Frequency Range below 150 kHz"

#### Dr.-Ing. Jörg Meyer

- VDE (ETG) Task Force Aktive EnergieNetze

## Dipl.-Ing. Sascha Müller

- Jungmitgliederreferent VDE Dresden

### Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner

- VDE (ETG) Task Force Grundsätzliche Auslegung Neuer Netze (Vorsitzender)
- CIGRE Study Committee B5 Protection and Automation
- Mitglied des Fachkollegiums 408-03 Elektrische Energieerzeugung, -übertragung, -verteilung und -anwendung der DFG
- Council member of the Power Systems Computation Conference (PSCC)
- Freunde und Förderer der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik (Mitglied des Vorstands)
- VDF Dresden Arbeitskreis: Relais- und Schutztechnik

#### Dr.-Ing. Uwe Schmidt

- VDE Dresden Arbeitskreis: Koordination der Isolation (Vorsitzender)
- VDE Dresden Arbeitskreis: Kabeltechnik
- DKE/K 122 Isolationskoordination
- IEC TC 28/MT6 (Maintenance Team of IEC 60071-2)
- ETG-Arbeitskreis Sternpunktbehandlung in Netzen bis 110 kV

#### Dipl.-Ing. Jens Werner

- VDE (ETG) Task Force Wärme- und Kälteversorgung in flexiblen Energieversorgungsystemen mit hohen Anteilen an erneuerbaren Energien

## 4.3.2 Lehrstuhl Hochspannungs- und Hochstromtechnik

### Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann

- Dekan der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
- Mitglied der Bereichsleitung des Bereiches Ingenieurwissenschaften
- Mitglied im Vorstand des VDE-Bezirksvereins Dresden e.V.
- Mitglied im Arbeitskreis Hochspannungsgeräte und -anlagen im VDE-BV Dresden
- Mitglied im VDE-ETG-Fachbereich Q3 Kontaktverhalten und Schalten
- Gesellschaft von Freunden und Förderer der TU Dresden e.V.
- Vorsitzender des Vereins der Freunde und Förderer der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik e.V.
- CIGRÉ-WG D1.54 Priciples to measure the AC and DC resistance of conductors

#### Dipl.-Ing. Hans-Peter Pampel

- UK 214.5 Ausrüstungen und Geräte zum Arbeiten unter Spannung; Arbeitsgeräte und starre Schutzvorrichtungen der DKE
- Fachausschuss V2.2 Arbeiten unter Spannung der ETG im VDE

#### Dipl.-Ing. Maria Hering

- Invited Guest in CIGRÉ WG D1.51 Dielectric performance of eco-friendly gas insulated systems
- Invited Guest in CIGRÉ JWG D1/B3.57 Dielectric Testing of gas-insulated HVDC Systems

## 5 Veranstaltungen

## Workshop "Netzschutz in Verteilnetzen mit dezentralen Erzeugungsanlagen" am 06.12.2013

Im Rahmen des durch den europäischen Sozialfonds ESF geförderten Projektes "Energiewende Sachsen im transnationalen Kontext - ENERSAX" wurde am 06.12.2013 ein Workshop durchgeführt, in dem aktuelle Themen der Schutztechnik vorgestellt und diskutiert wurden. Dabei stand der Einfluss von dezentralen Erzeugungsanlagen im Vordergrund. Es wurden Schutzkonzepte für dezentrale Erzeugungsanlagen präsentiert. Insbesondere die Erkennung von unbeabsichtigten elektrischen Inselnetzen wurde thematisiert und kontrovers diskutiert. Vortragende waren Prof. Dr. Fickert (TU Graz), Dr. Fuchs (DNV-KEMA), Fr. Aigner (TU Graz), Dr. Öchsle (ENBW) und Hr. Fischer (Stromnetz Berlin). Hr. Palm (TU Dresden) stellte die Grundlagen der Inselnetzdetektion für verschiedene Arten von dezentralen Erzeugungsanlagen vor.

## 6. REWE Teamchallenge

Am 21.04.2014 um 20.00 Uhr startet in Dresden bei bestem Laufwetter die mittlerweile 6. REWE Teamchallenge. Die Veranstaltung zählt mit seinen 9000 Startern zu Sachsens größten Firmenläufen. Auch unser Institut war wieder mit 4 Teams zu je 4 Läufern vertreten. Die Teams bildeten dabei ehemalige und aktuelle Mitarbeiter. Auch ein komplettes Frauenteam konnte aufgestellt werden. Unser bestes Team "EV-Flitzpiepen" belegte dabei in der Teamwertung sogar den 16. Platz.







Team

## "Dresdener Kreis 2014" am 19. und 20.03.2014

Am 19. und 20.03.2014 fand das 15. Treffen des Dresdener Kreises an der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig statt.

In zwei Vortragsreihen mit jeweils vier Themen wurden aktuelle Forschungsthemen und -ergebnisse der beteiligten Institute präsentiert und diskutiert. Das Themenspektrum war breit gefächert und umfasste unter anderem die Nachbildung von HGÜ-Seekabeln, Netzrückwirkungen von Elektrofahrzeugen und die Modellierung von Offshore-Windparks. Der erste Tag wurde mit einem gemeinsamen Abendessen in "Auerbachs Keller" und der dazugehörigen Fasskellerzeremonie abgeschlossen.

Der zweite Tag begann mit einer interessanten Besichtigung der Leipziger Innenstadt, die durch Prof. Winkler geführt wurde. Durch den neuen Leipziger City-Tunnel konnte bis zur Mittagszeit das Völkerschlachtdenkmal erreicht und besichtigt werden. Im thematisch dazu passenden "Brauhaus Napoleon" wurde zu Mittag gegessen. Den Abschluss des Treffens bildete eine Besichtigung der Produktion im Leipziger BMW-Werk.



Gruppenfoto des Dresdener Kreises in Auerbachs Keller

## 22. Kolloquium Hochspannungs- und Anlagentechnik

In diesem Jahr hatten die Mitarbeiter des Lehrstuhls für Hochspannungsund Hochstromtechnik eine besonders kurze Anreise zum jährlich stattfindenden "Darmstädter Kreis", denn die Partnerlehrstühle aus Darmstadt, Ilmenau, München und Zittau/Görlitz waren nach Dresden eingeladen.

Im Zentrum des Kolloquiums stand unverändert der wissenschaftliche Austausch zwischen den Lehrstühlen. Aktuelle Forschungsschwerpunkte waren ruhende, elektrische Verbindungen, das Schaltverhalten von DC-Schützen und Vakuumschaltern, das Isoliervermögen alternativer Isoliergase und –gemische, das Verhalten und die Wirkung von Lichtbögen sowie die Eigenschaften von Isoliersystemen unter hoher Gleichspannung.

Neben dem wissenschaftlichen Austausch wurde mit einer technischen Führung in der Semperoper den Kollegen der Beweis erbracht, dass dort kein Bier gebraut wird. Nach einem abendlichen Institutsrundgang fanden sich alle Teilnehmer zu einem gemütlichen Grillabend vor den Toren der Hochspannungshalle ein. Nachdem auch die letzte Bratwurst einen Abnehmer gefunden hatte, wurden traditionsgemäß zahlreiche lokale Aufmerksamkeiten von den Gästen überreicht - dafür noch einmal herzlichen Dank



Führung durch die Laborräume



Führung in der Semperoper



Gemütlicher Grillabend

Fotos: Prof. Großmann

# Assistentenfahrt der Professur Hochspannungs- und Hochstromtechnik vom 16.–18. Mai 2014 nach Hinterhermsdorf

Am Lehrstuhl für Hochspannungs- und Hochstromtechnik ist es seit langer Zeit Tradition, dass jedes Jahr die Heimat eines wissenschaftlichen Mitarbeiters erkundet wird. Dazu wurden in diesem Jahr die Mitarbeiter/-innen mit ihren Familien nach Hinterhermsdorf in der Hinteren Sächsischen Schweiz eingeladen.

Nach der Anreise durch das malerische Kirnitzschtal zum "Hotel Sonnenhof" führte uns am Freitag ein gemeinsamer Abendspaziergang zum und auf den nahegelegenen Weifbergturm. Dort genossen wir die Aussicht über die Nationalparke der Sächsischen und Böhmischen Schweiz. Zum Abendessen kehrten wir im "Gasthof Erbgericht" ein.

Trotz leichten Nieselregens brachen wir am Samstagmorgen zur geplanten Wanderung auf. Bald erreichten wir über das Schäferräumicht das Weißbachtal. Dem Weißbach, der sich entlang der Grenze zur Tschechischen Republik schlängelt, folgten wir flussabwärts. Ein schmaler Pfad führte uns dabei in völliger Einsamkeit bis zur Mündung in die Kirnitzsch. Wenig später erreichten wir vorbei an der Niedermühle die Bootsstation der Oberen Schleuse. Nach einer kurzen Stärkung ließen wir uns die 700 m bis zur Staumauer in einem Kahn flößen. Der Bootsführer wies uns mit erheiternden Geschichten auf die Felsgebilde im Sandstein hin, die mit Fantasie so machen Berggeist erkennen ließen. Nach der Bootsfahrt stiegen wir durch eine enge Felsspalte steil zum Hermannseck auf und erfreuten uns an der Aussicht. Zum abendlichen Grillen begrüßten wir dann auch unsere zwei Familien mit Babybauch, die den Tag im Freigelände der "Waldhusche" verbracht hatten.

Am Sonntag führte uns der Heimweg noch am Technischen Denkmal "Neumannmühle" vorbei. In einer Führung erfuhren wir, wie diese Sägemühle einst Holzschliff zur Papierherstellung produzierte. Schließlich konnte der Staffelstab für die nächste Assistentenfahrt an zwei Kollegen übergeben werden.



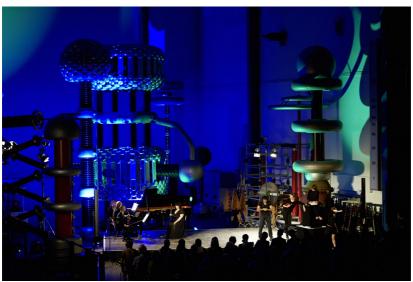
Gruppenfoto auf dem Hermannseck

## Sound & Science in der Hochspannungshalle

Mit einem gemeinsam veranstalteten Konzert der Reihe Sound & Science starteten am 26. Mai 2014 die TU Dresden und die Dresdner Musikfestspiele in der Hochspannungshalle ihre vereinbarte Zusammenarbeit. Die ausverkaufte Hochspannungshalle bildete den Rahmen für Strawinskys "Geschichte vom Soldaten" - musiziert von Musikern des New Yorker Orchesters The Knights und von jungen Künstlern der "Bohéme 2020" in Szene gesetzt. Im zweiten Teil des Abends wurde die ALTANA Galerie zum Klangraum. In entspannter Atmosphäre konnte sich das Publikum von Kammermusik, Werken von Phillip Glass, Video- und Lichtinstallationen sowie elektronischen DJ-Klänge inspirieren lassen.

Die geäußerte Begeisterung des Publikums und der Künstler über die Hochspannungshalle und den Lichthof des Görgesbau zeigte erneut die von Laboreinrichtungen der Hochspannungs- und Energietechnik weit über deren ursprüngliche Bestimmung hinausgehende Faszination. Die mit diesem Auftakt gelungene, weil spannende Begegnung von Klang und Wissenschaft, von Künstlern und Wissenschaftlern macht neugierig auf mehr.

Sound & Science wird als gemeinsame Reihe 2015 im Rahmen der Zusammenarbeit der TU Dresden und der Dresdner Musikfestspiele 2015 mit Veranstaltungen im Biologie-Neubau und dem Andreas-Pfitzmann-Bau fortgeführt.



Strawinskys "Geschichte vom Soldaten"
Foto: Stephan Floss/Dresdner Musikfestspiele

### The 27th International Conference on Electrical Contacts

Industrievertreter und Forscher auf dem Gebiet des Langzeit- und Schaltverhaltens elektrischer Kontakte trafen sich in diesem Jahr vom 22. bis 26. Juni auf der 27th International Conference on Flectrical Contacts in Dresden Dresden ist nach den Veranstaltungen in München, Berlin und Nürnberg erst der vierte Ort in Deutschland an dem diese wichtige Veranstaltung als Plattform für den Informationsaustausch zwischen Wissenschaftlern unter anderem auf den Gebieten: Grundlagen elektrischer Kontakte, Kontaktwerkstoffe, Steckverbinder, Schaltvorgängen/Lichtbogenphänomene, sowie der Modellierung und Simulation stattfand. An der diesjährigen Veranstaltung wurden 118 wissenschaftliche Beiträge aus 13 Ländern in den dazugehörigen Vorträgen oder Posterpräsentationen vorgestellt und ausgiebig diskutiert. Neben den wissenschaftlichen Beiträgen im internationalen Congress Center, hatten die Teilnehmer die Möglichkeit sich über Forschungsschwerpunkte des Lehrstuhls für Hochspannungs- und Hochstromtechnik und des Instituts für Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik der TU Dresden sowie des Lehrstuhls für Elektrische Geräte und Anlagen der TU Ilmenau zu informieren. Abschließend wurde ein Experimentalvortrag zu elektrischen Phänomenen in der Hochspanungshalle gezeigt. Die nächste ICEC wird im üblichen 2-Jahres-Abstand 2016 in Edinburgh UK stattfinden.



Technical program: Vorstellen von Themen und Versuchen am IEEH der TUD



Willkommensveranstaltung zur ICEC 2014 in Dresden



Albert-Keil-Preis: Prof. Dr.-Ing. Manfred Lindenmayer und Dr. Paul Slade

## "Power" - Grill am 21.05.2014

Im Rahmen des "Power" - Grillens hinter der Hochspannungshalle nutzten auch 2014 wieder zahlreiche Studenten die Gelegenheit zum Gespräch mit den Hochschullehrern und Mitarbeitern des Elektrotechnischen Instituts (ETI) und des Instituts für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik (IEEH). Den interessierten, angehenden Ingenieuren bot sich die Möglichkeit, mehr über die Vertiefungsrichtung Elektroenergietechnik im Hauptstudium zu erfahren. Die Hochspannungshalle sowie die Praktikumsversuchsstände und die aktuellen Projektarbeiten der Institute wurden bei Laborbesichtigungen vorgestellt. Somit konnten in lockerer Atmosphäre bei Grillgut Fragen beantwortet, Eindrücke für kommende Semester gewonnen und neue Kontakte geknüpft werden. Auf eine gute Zusammenarbeit zwischen Lehrenden und Studierenden wird an unserem Institut in besonderem Maße Wert gelegt.

#### Studentenexkursion zum UW Dresden-Neustadt

Im Rahmen der Vorlesung Elektroanlagenprojektierung findet regelmäßig eine Exkursion in ein Umspannwerk der DREWAG statt. Die diesjährige Besichtigung fand am 04.07.2014 statt. Besichtigt wurde das 110/20 kV Umspannwerk Dresden-Neustadt. Die Studenten erhalten damit die Möglichkeit die praktische Anwendung des in der Vorlesung theoretisch vermittelten Wissens kennenzulernen. Abgerundet wurde der Besuch durch die fachkundige Führung eines DREWAG Mitarbeiters.





Freiluftanlage

Fachkraft

## 12. Dresdner Lange Nacht der Wissenschaften 2014

Am Freitag, dem 04. Juli 2014, öffneten die Dresdner Hochschulen und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen zur "12. Dresdner Langen Nacht der Wissenschaften" ihre Pforten und begrüßten interessierte Besucher. Mit einem Rekordangebot an Veranstaltern, verteilt auf 95 unterschiedliche Orte in Dresden, konnte der Erfolg vom vorangegangen Jahr noch einmal übertroffen werden.

Auch in diesem Jahr beteiligte sich das Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik wieder mit hochspannenden Experimentalvorträgen unter dem Titel "Faszination Elektrizität - Experimentalvortrag zu hochspannungstechnischen Phänomenen und technischen Lösungen" an der Veranstaltung. Es wurde über aktuelle Forschungsinhalte, Trends in der Elektroenergietechnik und Entladungsphänomene berichtet. Dabei standen die Live-Experimente, gipfelnd mit dem simulierten Einschlag eines Blitzes in ein mit Personen besetztes Fahrzeug, im Mittelpunkt. Unser Team bedankt sich bei den Besuchern für das rege Interesse, die Geduld an der Warteschlange und auch in diesem Jahr wieder für ausgebuchte Veranstaltungen.



Experimentalvortrag in der Hochspannungshalle

## Exkursion in das Trainings- und Schulungszentrum für den HS-Freileitungsbau nach Korbußen

Am 17. Juli fand die Vorlesungsreihe "Ausgewählte Kapitel der Elektroenergietechnik" mit einer Exkursion in das Trainings- und Schulungszentrum für den Hochspannungs-Freileitungsbau der Firma GA Hochspannung Leitungsbau ihren würdigen Abschluss. Die Exkursion wurde von Herrn Dr.-Ing. habil. K. Papailiou organisiert, der als Gastdozent der Vorlesungsreihe die Aspekte des Planens und Berechnens von Freileitungen vermittelte. Bei sonnigem Wetter begaben sich 18 Teilnehmer mit dem Bus auf den Weg nach Korbußen. Die Teilnehmer wurden durch das Team von GA vor Ort sehr freundlich empfangen. Zunächst wurden das Unternehmen sowie das Trainings- und Schulungszentrum vorgestellt. Im Anschluss konnten die Teilnehmer an verschiedenen Stationen ausgewählte Arbeitsabläufe üben, z. B. das Montieren einer Spiralarmatur (Bild). Der erlebnisreiche Tag endete mit einem herzlichen Dank an die Gastgeber und den Organisator. Es wurde ein baldiges Wiedersehen vereinbart.



Findrücke von der Exkursion

## Sternpunktbehandlung in 110-kV-Netzen – Auswirkungen der Energiewende und Perspektiven

Am 02./03. September 2014 fand im Rahmen des durch den Europäischen Sozialfond ESF geförderten Projektes "Energiewende Sachsen – ENERSAX" ein durch die Universitäten Graz und Dresden organisierter Workshop statt, der sich mit aktuellen Fragestellungen der Sternpunktbehandlung in 110-kV-Netzen beschäftigte. In den Vorträgen und Diskussionen wurden insbesondere der Einfluss des Zubaus regenerativer Erzeugungsanlagen, die Einbindung neuer Freileitungs- und Kabeltrassen auf die Sternpunktbehandlung in den Verteilnetzen diskutiert. Im Fokus standen insbesondere die Einflüsse auf den Fehlerstrom (Erdschluss-Reststrom) bei der Resonanz-Sternpunkterdung. Dabei wurden auch die Konsequenzen des Anteiles von Oberschwingungen im Erdschluss-Reststrom diskutiert. Vortragende waren unter anderem Prof. Dr. Fickert (TU Graz), Dr. Druml (Trench Austria) und Dr. Schmidt (TU Dresden).



## Internationale Sommerschule "ENERStore 2014" vom 22.09. bis 27.09.2014

Die Sommerschule zum Thema Energiespeicher des Forschungsclusters *Combined Storage Systems Integration* wurde gemeinsam mit den Kollegen des Maschinenwesens unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner ausgerichtet. Sie war Teil des "Summer of Excellence" der Technischen Universität Dresden.

Eine nachhaltige und zum großen Teil auf erneuerbaren Energieträgern basierende Energieversorgung benötigt zwingend Energiespeicher. Diese Energiespeicher sind einerseits erforderlich um den Ausgleich zwischen der dargebotsabhängigen Erzeugung und der fluktuierenden Energienachfrage herzustellen und andererseits dienen diese für die Steigerung der Effizienz der Energieversorgung.

Im Rahmen der Sommerschule ENERstore 2014 wurden verschiedene Sichtweisen unterschiedlicher Wissenschaftsgebiete und deren Methoden in Bezug zum Thema "Energiespeicher" präsentiert. Das Kursprogramm umfasste die Vorträge zu aktuellen physikalischen und technologischen Grundlagen, Fragen der Integration von Energiespeichern in Energiesysteme und dem optimierten Betrieb von Speichern. Darüber hinaus wurden auch Aspekte der stofflichen Nachhaltigkeit, der wirtschaftlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen erläutert. In den Vorträgen wurden unterschiedliche Speicherarten bzw. –technologien (chemische, elektrische, mechanische und thermische Speicher) vom Ausgangsmaterial, über das Speichermodul bis hin zu deren Systemintegration präsentiert. Basis der Vorträge bilden aktuelle Ergebnisse aus nationalen und internationalen Forschungsprojekten. Im Rahmen der Sommerschule erfolgte auch eine Exkursion.

An der Sommerschule nahmen 35 Doktoranden aus 24 Ländern, von Australien über Kamerun bis Usbekistan teil. Genauso international wie die Zuhörer waren auch die Dozenten. Neben Professoren der Technischen Universität Dresden wurden die Beiträge von Dozenten aus Dänemark, Frankreich, der Tschechischen Republik und den USA präsentiert.

Es ist vorgesehen diese Sommerschule auch wieder im nächsten Jahr auszurichten.



Präsentation während der ENERstore 2014



Exkursion in Dresden

## Projekttag am 17. Oktober 2014: Besuch des Uhrenmuseums in Glashütte

Der diesjährige Projekttag führte das Institut in die Stadt der Uhren - Glashütte. Wir besuchten das Uhrenmuseum, welches früher selbst eine Uhrmacherschule war und seit 2008 als Museum fungiert und den Besuchern ermöglicht, in die Faszination Uhrenbau einzutauchen. In zwei Führungen wurde uns von den Anfängen des Uhrmacherhandwerks in der Region bis hin zur heutigen Zeit erläutert, wie Uhren aus filigranen Einzelteilen zusammengesetzt werden und wie die Funktionsweise unterschiedlicher Modelle ist. Einige der Mitarbeiter durften sich sogar selbst als Uhrmacher versuchen.







Besuch des Uhrenmuseums

Nach dem Besuch in Glashütte konnten wir während der Bahnfahrt in Richtung Weesenstein das Müglitztal genießen. Angekommen auf Schloß Weesenstein wurde zünftig in der Schlossküche geschmaust und so konnte der Tag gemütlich ausklingen.







Mittagessen in der Schlossküche

## 19. Tag der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik am 7. November 2014

Anlässlich des Tages der Fakultät werden stets auch die besten Studenten und Doktoranden in feierlichem Rahmen mit Preisen gewürdigt. Wir freuen uns, dass in diesem Jahr zwei Preise an unser Institut gingen.

Den HIGHVOLT-Preis für die beste Diplomarbeit auf dem Gebiet der Elektroenergietechnik erhielt Herr Tobias Maximilian Mittrach für seine Arbeit zur "Komplexkalibrierung eines unkonventionellen Verlustmesssystems".



Herr Thomas Steiner, Leiter Technik der HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH und der Dekan, Prof. Steffen Großmann überreichen den HIGHVOLT-Preis an Herrn Tobias Maximilian Mittrach Fotos: Arne Sonnenburg, TU Dresden



Matthias Voigt, IEEH (rechts) und Dr. Rico Radeke, IfN (links) bei der Preisverleihung

Der Verein der Freunde und Förderer der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik e.V. vergibt einen eigenen Preis in diesem Jahr an zwei wissenschaftliche Mitarbeiter, die sich durch herausragendes Engagement für die Fakultät verdient gemacht haben. Einer der beiden Preise geht an Herrn Dipl.-Ing. Matthias Voigt. Gewürdigt wird damit seine mehrjährige ehrenamtliche Tutorentätigkeit für Studenten der Erstsemester, die er mit großem persönlichem Einsatz und methodischem Geschick durchführt.

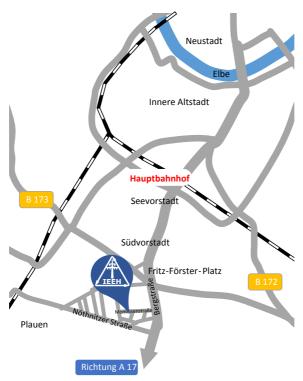
Wir gratulieren beiden Preisträgern recht herzlich.

## Anfahrtsskizze

Sitz des Institutes: Mommsenstraße 10/12 (Binderbau/Toeplerbau)

Erdgeschoss Zi. 124/125

01069 Dresden



#### So finden Sie zu uns:

- Vom Flughafen Dresden mit S-Bahnlinie S2 bis Dresden-Hauptbahnhof.
- Ab Dresden-Hauptbahnhof mit den Straßenbahnlinien 3 (Richtung Coschütz) und 8 (Richtung Südvorstadt) bis Haltestelle Nürnberger Platz oder mit der Buslinie 66 (Richtung Coschütz/Mockritz) bis Haltestelle Mommsenstraße
- Über die Autobahn A 17, Abfahrt Dresden-Südvorstadt, in Richtung Stadtzentrum bis zur Universität (Mommsenstraße).