



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN

Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

# Jahresbericht 2015

INSTITUT FÜR ELEKTRISCHE ENERGIEVERSORGUNG  
UND HOCHSPANNUNGSTECHNIK





# Vorwort

Sehr geehrte Freunde des Instituts für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik,

mit dem vorliegenden Jahresbericht 2015 möchten wir Sie über Neuigkeiten, wichtige Ereignisse und aktuelle Aktivitäten in Forschung und Lehre am Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik und der Technischen Universität Dresden informieren.

Ein wichtiges Ereignis an unserer Universität war die Wiederwahl des Rektors Prof. Hans Müller-Steinhagen im Mai für die Zeit von 2015 bis 2020. Als eine der vorrangigen Aufgabe für seine zweite Amtszeit sieht er die Stärkung der Lehre. Dies umfasst insbesondere auch deren Organisation. Eine weitere wichtige Aktivität wird die Wiederbewerbung im Rahmen der Exzellenzinitiative im Jahr 2016 sein.

Das zentrale Thema auf dem Gebiet der Energietechnik war auch im letzten Jahr die Energiewende. Die elektrische Energieversorgung durchläuft einen starken Wandel, welcher einerseits die Netzstrukturen auf Transport- und Verteilungsebene und andererseits die Komponenten des elektrischen Versorgungssystems betrifft. Man geht davon aus, dass im Jahr 2015 fast 34 % der gesamten elektrischen Energie durch erneuerbare volatile Energieträger bereit gestellt wurden. Hieraus ergaben sich zahlreiche Forschungsfragen, die unmittelbar die Aktivitäten unseres Instituts tangierten.

Es wird in Zukunft erforderlich, dass auch Windkraft- und Photovoltaikanlagen Systemdienstleistung bereitstellen. Um die volatile Einspeisung ausregeln zu können, wird es notwendig, dass  $\mu$ -KWK-Anlagen und leistungsstarke Verbraucher im Niederspannungsnetz gesteuert werden. Darüber hinaus treten durch den Einsatz von netzgeführten Wechselrichtern verstärkt Beeinflussungsprobleme in einem Frequenzbereich bis 150 kHz auf.

An viele der Komponenten unseres sich verändernden Energieversorgungssystems werden neue Anforderungen hinsichtlich der Beanspruchung durch hohe Spannungen, der Stromtragfähigkeit, der Verbindungstechnologien und der Beherrschung möglichst geringer Verluste und der sich daraus ergebenden Erwärmung der Betriebsmittel gestellt.

Zahlreiche neue Forschungsprojekte unseres Instituts mit Partnern aus der Industrie und Energiewirtschaft sowie mit öffentlichen Einrichtungen (EU, Bund, AiF) leisten einen Beitrag, die dargestellten Fragen zu lösen.

In den Räumen des Instituts (Toeplerbau Sockelgeschoss und Binderbau) gehen die Baumaßnahmen weiter und werden unsere Arbeit noch bis ins nächste Jahr begleiten. Die damit verbundenen Einschränkungen, insbesondere im Laborbereich, fordern von allen Mitarbeitern viel Geduld, Anstrengungen und

Kreativität, um die wichtigsten Aufgaben dennoch in höchster Qualität erledigen zu können.

Für ausgewählte Vorlesungen konnten wir wieder dankbar auf die Erfahrungen externer Fachleute zurückgreifen: Herr Dr. habil. Konstantin Papailiou, Herr Dr. Reiner Fiebig, Herr Matthias Kudoke sowie Herr Dr. Winfried Fricke, Herr Dr. habil. Frank Schmuck, Herr Thomas Dietrich und Herr Dr. Dirk Kunze. Bedanken möchten wir uns auch bei Herrn Professor Gert Hentschel, Herrn Dr. Matthias Hable und Herrn Dipl.-Ing. Jörg Schindler für ihre Lehrangebote. Ein besonderer Dank gilt 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.

Allen Forschungspartnern, mit denen wir auch in diesem Jahr wieder erfolgreich und in wachsendem Umfang zusammenarbeiten konnten, gilt unser ausdrücklicher herzlicher Dank.

Diesen Jahresbericht nehmen wir zum Anlass, allen Mitarbeitern des Instituts, Freunden und Partnern für ihre tatkräftige Mitarbeit und Unterstützung im vergangenen Jahr zu danken.

Wir wünsche Ihnen ein gesundes, erfolgreiches und frohes Jahr 2016 und freuen uns auf eine weiterhin gute Zusammenarbeit.

Dresden, Dezember 2015



Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner



Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Personelle Besetzung</b>	<b>4</b>
1.1 Lehrstuhl Elektroenergieversorgung . . . . .	4
1.2 Lehrstuhl Hochspannungs- und Hochstromtechnik . . . . .	6
1.3 Labor und Werkstatt . . . . .	7
<b>2 Lehre</b>	<b>8</b>
2.1 Lehrveranstaltungen . . . . .	8
2.1.1 Lehrveranstaltungen für das Grundstudium . . . . .	8
2.1.2 Lehrveranstaltungen für das Hauptstudium . . . . .	8
2.1.3 Lehrexport an andere Fakultäten – Grundstudium . . . . .	10
2.2 Studentische Arbeiten . . . . .	11
2.2.1 Studienarbeiten und Forschungspraktika . . . . .	11
2.2.2 Diplom- und Masterarbeiten . . . . .	15
<b>3 Forschung</b>	<b>18</b>
3.1 Lehrstuhl Elektroenergieversorgung . . . . .	18
3.1.1 Forschungsschwerpunkte und Forschungsprojekte . . . . .	18
3.1.2 Publikationen . . . . .	66
3.2 Lehrstuhl Hochspannungs- und Hochstromtechnik . . . . .	76
3.2.1 Forschungsschwerpunkte und Forschungsprojekte . . . . .	76
3.2.2 Publikationen . . . . .	110
3.3 Preise und Auszeichnungen . . . . .	114
3.4 Promotionen . . . . .	120
<b>4 Kooperationen</b>	<b>131</b>
4.1 Forschungsk Kooperation im Bereich Ingenieurwissenschaften der TUD . . . . .	131
4.2 Wissenschaftskooperationen . . . . .	132
4.3 Industriekooperationen . . . . .	134
4.4 Kommissions- und Gremienarbeit . . . . .	136
4.4.1 Lehrstuhl Elektroenergieversorgung . . . . .	136
4.4.2 Lehrstuhl Hochspannungs- und Hochstromtechnik . . . . .	138
<b>5 Veranstaltungen</b>	<b>139</b>

Titelbild: Messen des Kraftabbaus an Schraubenverbindungen mit Stromschienen

Foto: Stephan Schlegel

# 1 Personelle Besetzung

## 1.1 Lehrstuhl Elektroenergieversorgung

Titel	Nachname	Vorname	Telefon (0351-463-)
<i>Leiter der Professur</i>			
Prof. Dr.-Ing.	Schegner	Peter	34374/ Fax 37036
<i>Hochschullehrer</i>			
Hon.-Prof. Dr.-Ing.	Hentschel	Gert	
Dozent Dr.-Ing.	Bauer	Hartmut	35104
Prof. Dr.-Ing. habil.	Winkler	Gert	35088
<i>Dozenten und Lehrbeauftragte</i>			
Dr.-Ing.	Hable	Matthias	
Dr.-Ing.	Meyer	Jan	35102
Dr.-Ing.	Meyer	Jörg	35272
Dipl.-Ing.	Schindler	Jörg	
<i>Sekretariat</i>			
	Scharf	Regina	33202
<i>Projektmanagement</i>			
Dipl.-Ing.	Keller	Jan	35432
<i>Wissenschaftliche Mitarbeiter</i>			
M.Eng.	Blanco Castañeda	Ana Maria	32482
M.Sc.	Cabadag	Rengin Idil	43205
Dr.-Ing.	Dickert	Jörg	43201

<b>Titel</b>	<b>Nachname</b>	<b>Vorname</b>	<b>Telefon (0351-463-)</b>
<i>Wissenschaftliche Mitarbeiter</i>			
Dr.	Djokic	Sasa	(02/2015 bis 04/2015)
Dr.-Ing.	Domagk	Max	35223
Dipl.-Ing.	Erdmann	Niels	43203
Dipl.-Ing.	Heß	Tobias	32941
Dipl.-Ing.	Gasch	Etienne	43206
M.Sc.	Jäschke	Christian	35353
B.Eng.	Jimenez Manjarres	Yulieth	(bis 03/2015)
Dipl.-Ing.	Klatt	Matthias	43207
Dipl.-Ing.	Krahmer	Sebastian	39993
Dipl.-Ing.	Kreutziger	Marcus	43202
Dipl.-Ing.	Ma	Liya	43080
Dipl.-Ing.	Möller	Friedemann	43209
Dipl.-Ing.	Müller	Sascha	43210
Dipl.-Ing.	Palm	Sebastian	33094
Dipl.-Ing.	Schmidt	Maximilian	43081
Prof. Dr.-Ing.	Schmidt	Uwe	(bis 01/2015)
Dipl.-Ing.	Schnelle	Tobias	33725
Dipl.-Ing.	Stiegler	Robert	32217
Dipl.-Ing.	Ungethüm	Stefan	43208
M.Sc.	Wenzlaff	Karsten	43200
Dipl.-Ing.	Werner	Jens	33086
M.Sc.	Yanchenko	Sergey	(bis 03/2015)
M.Sc.	Zyabkina	Olga	

## 1.2 Lehrstuhl Hochspannungs- und Hochstromtechnik

Titel	Nachname	Vorname	Telefon (0351-463-)
<i>Leiter der Professur</i>			
Prof. Dr.-Ing.	Großmann	Steffen	33428/ Fax 37157

*Professoren und Hochschullehrer im Ruhestand*

Prof. Dr.-Ing. habil.	Eberhardt	Martin	
Dr.-Ing.	Engelmann	Eberhard	
PD Dr.-Ing. habil.	Löbl	Helmut	32138

*Dozenten und Lehrbeauftragte*

Dr.-Ing.	Fiebig	Reiner	
Dr.-Ing.	Fricke	Winfried	
Dipl.-Ing.	Kudoke	Matthias	
Dr.-Ing.	Kunze	Dirk	
Dr. techn. habil.	Papailiou	Konstantin	
Dr.-Ing. habil.	Schmuck	Frank	
Dr.-Ing.	Speck	Joachim	33105

*Sekretariat*

	Hendrich	Ulrike	33428
--	----------	--------	-------

*Projektmanagement*

Dipl.-Kfm.	Langos	Sebastian	32963
------------	--------	-----------	-------

*Wissenschaftliche Mitarbeiter*

Dipl.-Ing.	Adam	Robert	34789
Dipl.-Ing.	Backhaus	Karsten	33608
M.Eng.	Bakka	Maher	34948
Dr.-Ing.	Baumann	Matthias	33080
Dipl.-Ing.	Bäumli	Katrin	(extern)
Dipl.-Wi.-Ing.	Dreier	Sebastian	34756

<b>Titel</b>	<b>Nachname</b>	<b>Vorname</b>	<b>Telefon (0351-463-)</b>
<i>Wissenschaftliche Mitarbeiter</i>			
M.Sc.	Esmail Moghadam	Davoud	(bis 11/2015)
Dipl.-Ing.	Fuhrmann	Torsten	39982
Dipl.-Ing.	Gabler	Tobias	33608
Dipl.-Ing.	Gatzsche	Michael	34756
Dipl.-Ing.	Götz	Thomas	33608
Dipl.-Ing.	Heger	Julian	34789
M.Sc.	Helal	Khaled Arafa Aly	(seit 11/2015)
Dipl.-Ing.	Hering	Maria	33608
Dipl.-Ing.	Hildmann	Christian	33917
Dipl.-Ing.	Israel	Toni	(seit 12/2015)
Dipl.-Ing.	Kühnel	Christian	33917
Dr.-Ing.	Lücke	Nils	34756
Dipl.-Ing.	Pampel	Hans-Peter	33103
Dr.-Ing.	Pfeifer	Stephanie	39982
Dipl.-Ing.	Ramonat	Alexander	33917
Dr.-Ing.	Schlegel	Stephan	32746
Dipl.-Ing.	Voigt	Matthias	33080
<i>Technische Angestellte</i>			
Dipl.-Ing. (FH)	Göres	Axel	32613

### 1.3 Labor und Werkstatt

<b>Nachname</b>	<b>Vorname</b>	<b>Telefon (0351-463-)</b>
Dittrich	Ralf	34745
Eusewig	Falk	33516
Gläser	Michael	34260
Jarosczyński	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
<i>Modul Elektroenergietechnik</i>		
Elektroenergietechnik <i>Prof. Schegner</i>		3/1/0
Praktikum Elektroenergietechnik	0/0/1	

#### 2.1.2 Lehrveranstaltungen für das Hauptstudium

Vorlesungen / Übungen / Praktika	SS	WS
<i>Modul Hochspannungs- und Hochstromtechnik</i>		
Hochspannungs- und Hochstromtechnik <i>Prof. Großmann</i>		2/1/0
Praktikum Hochspannungs- und Hochstromtechnik		0/0/1
<i>Modul Grundlagen elektrischer Energieversorgungssysteme</i>		
Betriebsmittel und Berechnungsgrundlagen für elektrische Energieversorgungssysteme <i>Prof. Schegner</i>		2/1/0
Grundlagen der Elektroenergieanlagen		1/1/0
<i>Modul Betrieb elektrischer Energieversorgungssysteme</i>		
Betrieb von elektrischen Energieversorgungssystemen und -anlagen <i>Prof. Schegner</i>	2/1/0	
Praktikum Elektroenergiesysteme	0/0/1	
Praktikum Hochspannungstechnik 2	0/0/1	

Vorlesungen / Übungen / Praktika	SS	WS
<i>Modul Hauptseminar</i>		
Hauptseminar Elektrische Energietechnik <i>Prof. Schegner/ Prof. Großmann</i>	0/2/0	
<i>Modul Oberseminar</i>		
Oberseminar Elektrische Energieversorgung <i>Prof. Schegner/ Prof. Großmann</i>		0/2/0
<i>Modul Systemverhalten und Versorgungsqualität elektrischer Energieversorgungssysteme</i>		
Betriebsvorgänge in Energieversorgungssystemen <i>Prof. Schegner</i>	2/1/0	
Versorgungsqualität <i>Prof. Schegner/ Dr. Jan Meyer</i>	1/1/0	
Komplexpraktikum zum Netzbetrieb	0/0/1	
<i>Modul Planung elektrischer Energieversorgungssysteme</i>		
Netzplanung <i>Prof. Schegner/ Dr. Hable</i>	1/1/0	
Elektroenergieanlagenprojektierung <i>Prof. Schegner/ Prof. Hentschel</i>	1/1/0	
Netzberechnung <i>Prof. Schegner</i>	2/2/0	
<i>Modul Vertiefung Hochspannungstechnik</i>		
Vertiefung Hochspannungstechnik <i>Prof. Großmann/ Dr. Speck</i>	5/0/0	
Praktikum Vertiefung Hochspannungstechnik	0/0/1	
<i>Modul Schutz- und Leittechnik in elektrischen Energieversorgungssystemen</i>		
Selektivschutztechnik <i>Prof. Schegner/ Dr. Jörg Meyer</i>		2/1/0
Leittechnik <i>Prof. Schegner/ Dipl.-Ing. Schindler</i>		1/1/0
Praktikum Sekundärtechnik		0/0/1

Vorlesungen / Übungen / Praktika	SS	WS
<i>Modul Beanspruchung elektrischer Betriebsmittel</i>		
Beanspruchung elektrischer Betriebsmittel <i>Prof. Großmann/ Dr. Schlegel/ Dr. Lücke/ Dipl.-Ing. Adam</i>		3/0/0
Beleg Geräte der Energietechnik <i>Prof. Großmann</i>		0/1/0
Praktikum Beanspruchung elektrischer Betriebsmittel		0/0/2
<i>Modul Experimentelle Hochspannungstechnik</i>		
Experimentelle Hochspannungstechnik <i>Prof. Großmann/ Dr. Speck</i>		4/0/0
Praktikum Experimentelle Hochspannungstechnik		0/0/2
<i>Weitere Vertiefungsfächer</i>		
Speicherung elektrischer Energie <i>Prof. Schegner</i>	2/1/0	
Elektrische Lasten und Lastmanagement <i>Prof. Schegner</i>		1/1/0
<i>Ausgewählte Kapitel der Elektrischen Energietechnik</i>		
Freileitungsbau Hochspannungsgeräteentwicklung <i>Prof. Großmann/ Dr. Papailiou/ Gastdozenten</i>		2/1/0
Elektrosicherheit und Versorgungszuverlässigkeit <i>Doz. Dr. Bauer</i>	2/1/0	

### 2.1.3 Lehrexport an andere Fakultäten – Grundstudium

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

## 2.2 Studentische Arbeiten

### 2.2.1 Studienarbeiten und Forschungspraktika

Kubank, Marcel

*Integration der Regelung eines Maschinensatzes in den Versuchsstand „Combined Energy Lab“*

23/2013 (Betreuer: Dipl.-Ing. Werner)

Liu Ying

*Berechnung der Spannungs-Unsymmetrie auf 110-kV-Freileitungen in Abhängigkeit der Leitungsparameter*

25/2013 (Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Schmidt)

Schindler, André

*Messung, Simulation und Beurteilung der Strom- und Spannungsharmonischen in einem Niederspannungsnetz mit zentraler Ladung von Elektrofahrzeugen*

03/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Müller)

Rasti, Sasan Jacob

*Bestimmung des Kontaktwiderstandes unbeschichteter Al-Kontakte infolge von Fremdschichtwachstum durch Oxidation und Korrosion abhängig von den Umweltbedingungen*

06/2014 (Betreuer: Dipl.-Wi.-Ing. Dreier)

Faust, Niklas Constantin

*Bestimmen des Kontaktwiderstands unbeschichteter Kupfer-Kontakte infolge von Fremdschichtwachstum durch Oxidation und Korrosion abhängig von den Umweltbedingungen*

07/2014 (Betreuer: Dipl.-Wi.-Ing. Dreier)

Jahn, Markus

*Bestimmen der Stromverteilung in elektrischen Kontakten infolge von Fremdschichtwachstum durch Oxidation und Korrosion*

09/2014 (Betreuer: Dipl.-Wi.-Ing. Dreier)

Nebe, Benjamin

*Untersuchung der Spannungsverteilung in umrichter gespeisten Motorenwicklungen*

10/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Davoud Esmail Moghadam)

Cui, Zhuangqian

*Simulation und Beurteilung der Spannungsunsymmetrie in Niederspannungsnetzen mit zentraler Ladung von Elektrofahrzeugen*

11/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Möller)

Boß, Valentin

*Untersuchung der dielektrischen Eigenschaften verschiedener Isolierstoffe für rotierende Maschinen*

13/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Backhaus)

Schladitz, Markus

*Entwicklung eines Hochstromgleichrichters*

16/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Hildmann)

Hrebtov, Dimitri

*Schnelle Störlichtbogenerkennung mit Frequenzbereichsalgorithmen*

19/2014 (Betreuer: M.Sc. Wenzlaff)

Däberitz, Felix

*Schnelle Störlichtbogenerkennung mit Zeitbereichsalgorithmen*

20/2014 (Betreuer: M.Sc. Wenzlaff)

Rademacher, Stephan

*Untersuchung des Übertragungsverhaltens von Ortsnetztransformatoren im Frequenzbereich von 2 kHz bis 150 KHz*

22/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Ungethüm)

Lu, Yuhao

*Verifikation von Algorithmen zur automatischen Identifikation von Zustandsänderungen in Messdaten*

26/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Gasch)

Brunne, Alexander

*Versuchskonzeption zur Nachbildung von Kabelfehlern mit einpoliger Kurzunterbrechung auf gemischten Übertragungsstrecken*

29/2014 (Betreuer: Dr.-Ing. Jörg Meyer)

Li, Qingchen

*Grundlagenuntersuchungen zur Alterung von Bimetall-Verbindungen mit Leitern aus Aluminium und Kupfer*

30/2014 (Betreuer: Dr.-Ing. Schlegel)

Hennig, Felix

*Zwischenharmonische bei Photovoltaik-Wechselrichtern*

31/2014 (Betreuer: Dr.-Ing. Jan Meyer/Dipl.-Ing. Müller)

Israel, Toni

*Entladungsbeständigkeit ausgewählter Kunststoffseile*

32/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Pampel)

Naumann, Manuel

*Analyse der Elektroenergiequalität in einem ländlichen Niederspannungsnetz mit hoher Durchdringung von Photovoltaik-Anlagen und Elektrofahrzeugen anhand von Messungen*

33/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Möller)

Latarius, André

*Einsatz von elektrischen Speichern als Netzbetriebsmittel in Verteilnetzen*

34/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Heß)

Zhang, Chaoy

*Untersuchung der Emission elektronischer Geräte für den Massenmarkt im Frequenzbereich von 2 kHz bis 150 kHz*

35/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Ungethüm)

Zhang, Nan

*Untersuchung des Einflusses von Spannungs- und Frequenzänderungen auf die Leistungsaufnahme von Verbrauchern*

36/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Palm)

Schillig, Benjamin

*Auslegung und Bewertung verschiedener Blindleistungs-Regelungsverfahren im 110-kV-Verteilnetz*

37/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Kreuziger)

Backmann, Gerrit

*Bewertung verschiedener Verfahren zur Berechnung von Oberschwingungsgrenzwerten für den Anschluss großer Abnehmer- und Erzeugeranlagen an das Verteilungsnetz*

38/2014 (Betreuer: Dr.-Ing. Jan Meyer)

Begoll, Romano

*Auswertung der Oberschwingungsmessungen in einem öffentlichen Niederspannungsnetz mit verteilter Einspeisung*

39/2014 (Betreuer: Dr.-Ing. Jan Meyer)

Wever, Caroline

*Bestimmung des Ladungsträgerinjektionsverhaltens in mineralisches Isolieröl bei hoher Gleichspannung*

40/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Backhaus)

Schultz, Marco

*Austausch eines Leitungsdistanzschutzgerätes am Dynamischen Drehstromnetzmodell*

41/2014 (Betreuer: Dr.-Ing. Jörg Meyer)

Gelleschus, Ronny

*Comparison of harmonic emission in residential low voltage grids in Colombia and Germany*

01/2015 (Betreuer: M.Eng. Blanco/Dr.-Ing. Jan Meyer)

Seeber, Paul

*Untersuchungen zur Alterung und zum Betriebsverhalten von Ganzbereichssicherungen*

02/2015 (Betreuer: Dipl.-Ing. Kühnel)

Groß, Silvio

*Analyse der Ausbreitung von Supraharmonischen in einem öffentlichen Niederspannungsnetz*

03/2015 (Betreuer: Dipl.-Ing. Ungethüm)

Kleyboldt, Sebastian

*Konzeption und Aufbau eines Versuchsstandes zum Messen des Einflusses von Sauerstoff auf elektrische Verbindungen mit silberbeschichteten Kontaktpartnern*

05/2015 (Betreuer: Dr.-Ing. Pfeifer)

### 2.2.2 Diplom- und Masterarbeiten

Wu, Yubiao

*Modellierung des Einflusses magnetischer Störeinkopplungen auf das Übertragungsverhalten von Hochstromwandlern*

05/2014 (Betreuer: M.Sc. Jäschke)

Wang, Rui

*FEM-Berechnung zum Endenglimmschutz-Verhalten unter Impulsspannung*

10/2014 (Betreuer: M.Eng. Wei)

Derlig, Toni

*Bestimmung der Ladungsträgermobilität in ölgetränktem Isolierpapier bei Belastung mit hoher Gleichspannung*

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

Friedrich, Axel

*Elektrische Modellierung und Untersuchung des Betriebsverhaltens der Erzeugungs- und Verbrauchsanlagen im Zentrum für Energietechnik (ZET)*

15/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Heß)

Schubert, Uwe

*Erstellung eines Berechnungsmodells zur Beschreibung des „virtuellen“ Stromabrisses bei Vakuum-Leistungsschaltern*

16/2014 (Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Schmidt)

Nguyen, Thanh Kim

*Experimentelle Untersuchungen zu verschiedenen Fügemethoden bei tiefen Temperaturen an normalleitenden und supraleitenden Materialien*

17/2014 (Betreuer: Dr.-Ing. Schlegel/Dipl.-Ing. Ramonat)

Gabler, Tobias

*Untersuchungen zum Verhalten fester Störstellen auf Isolatoren in gasisolierten Systemen bei Mischspannungsbelastung*

18/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Hering)

Lei, Ting

*Verfahren zur Bestimmung maximaler Überspannungen bei der Einschaltung von Leitungen im Hoch- und Höchstspannungsnetz*

19/2014 (Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Schmidt)

Urban, Martin

*Entwicklung einer Inselnetzlösung für das elektrische Netz im Uni-Klinikum Dresden*

20/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Palm)

Yan, Chunyang

*Untersuchung des spannungs- und frequenzabhängigen Lastverhaltens von 110-kV-Netzen*

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

Hauptmann, Henning

*Analyse von Oberschwingungsbelastung und Resonanzbildung in einem städtischen Niederspannungsnetz mit Wohnbebauung*

22/2014 (Betreuer: Dr.-Ing. Jan Meyer)

Schnelle, Tim

*Untersuchungen zum Einsatz von MS-seitig angeschlossenen Erzeugungsanlagen zur Blindleistungsbereitstellung für das vorgelagerte 110-kV-Netz*

23/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Kreuziger)

Götz, Thomas

*Untersuchungen zum kapazitiv-resistiven Übergang in gasisolierten Gleichspannungssystemen unter Anwesenheit einer festen Störstelle auf dem Isolator*

24/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Hering)

Heger, Julian

*Untersuchungen zum Vergleich verschiedener Rechenmethoden für die thermische Dimensionierung von explosionsgeschützten Niederspannungs-Energieverteileranlagen*

25/2014 (Betreuer: Dipl.-Ing. Adam)

Frowein, Karla

*Beschreibung von Oberschwingungsquellen für die Berechnung des Erdschluss-Reststromes bei Resonanz-Sternpunkterdung*

01/2015 (Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Schmidt)

Tiebel, Ralph

*Computer Based Analysis of Distributed Wind Farms for Reactive Power Balance in Power Systems*

02/2015 (Betreuer: M.Sc. Cabadag)

Liebermann, Carlo

*Berechnung induzierter Spannungen bei Leiter- und Erdseilzug auf 380-kV-Freileitungen*

03/2015 (Betreuer: Dr.-Ing. Schmidt)

Fricke, Oliver

*Vergleich von Algorithmen für ein optimiertes Blindleistungsmanagement in 110-kV-Verteilnetzen*

05/2015 (Betreuer: Dipl.-Ing. Kreuziger)

Hrebtov, Dimitri

*Signalverlaufsanalyse für eine schnelle Störlichtbogenerkennung in Niederspannungsschaltanlagen*

06/2015 (Betreuer: M.Sc. Wenzlaff)

Beyer, Michael

*Kontakteigenschaften von Silber-Kupfer-Schichtsystemen für Hochstrom-Steckverbinder*

07/2015 (Betreuer: Dipl.-Ing. Gatzsche)

Schladitz, Markus

*Verfahren zur Analyse der mechanischen Spannungsverteilung in elektrischen Verbindungen*

08/2015 (Betreuer: Dipl.-Ing. Hildmann)

Israel, Toni

*Ansätze zur elektrischen Modellierung von Flächenkontakten am Beispiel der Schraubenverbindung mit Stromschienen*

09/2015 (Betreuer: Dipl.-Ing. Fuhrmann)

Schultz, Marco

*Vergleich und Optimierung von Regelungsverfahren der Blindleistungsbereitstellung bezüglich ihrer Wirkung zur Spannungshaltung im Höchstspannungsnetz*

11/2015 (Betreuer: Dipl.-Ing. Kreuziger)

# 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.

#### Mess- und Energiewandler

- 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
- Systemdienstleistungen in Flächenverteilnetzen

## Power Quality

- Messgeräte-unabhängiges Datenbanksystem zur zentralen Speicherung von Messdaten der Elektroenergiequalität
- Effiziente Verfahren zur automatisierten, ortsübergreifenden Bewertung der Spannungsqualität bei großen Datenmengen
- Internetbasierte Austauschplattform für gemessene Oberschwingungsspektren von Haushaltsgeräten; PANDA (equiPment hArmoNic DAAtabase)
- 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 höherfrequenter Emission im Frequenzbereich 2 kHz bis 150 kHz im Niederspannungsnetz
- Optimierte Effizienz und Netzverträglichkeit bei der Integration von Erzeugungsanlagen aus Oberschwingungssicht
- Netzverträglichkeit in öffentlichen Niederspannungsnetzen im Frequenzbereich von 2 kHz bis 150 kHz

## 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 Transport- und 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
- Service-Plattform-Verteilnetze zum integralen Lastmanagement

## Projekt zum Forschungsschwerpunkt „Mess- und Energiewandler“



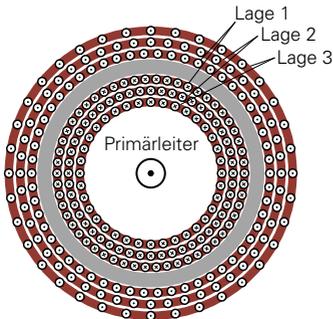
Christian Jäschke, M.Sc.

Berechnung der frequenzabhängigen Kopplungsinduktivitäten in der Wicklung von Hochstromwandlern

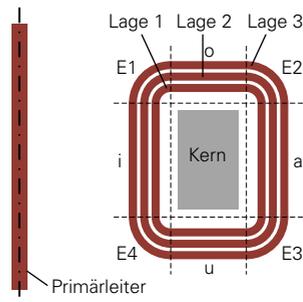
Aufgrund des zunehmenden Einsatzes elektronischer Lasten und leistungselektronischer Betriebsmittel steigen die Oberschwingungsströme in elektrischen Energieversorgungsnetzen. Um diese mit hinreichender Genauigkeit messtechnisch bestimmen zu können, wird die Eignung induktiver Hochstromwandler zum Messen hoher höherfrequenter Ströme untersucht.

Um die großen Windungszahlen fertigungstechnisch zu realisieren, ist die Sekundärwicklung von Hochstromwandlern auf mehrere übereinanderliegende Lagen verteilt (Bild 1a). Durch diesen speziellen Aufbau treten kapazitive und induktive Kopplungen zwischen den Wicklungslagen auf, die bei höheren Frequenzen zu Resonanzerscheinungen führen können.

Um abzuschätzen zu können, ab welcher Frequenz solche Resonanzerscheinungen zu erwarten sind, müssen die einzelnen Kopplungsinduktivitäten und Kapazitäten der Lagen bestimmt werden. Dazu wurde ein vereinfachtes Modell entwickelt, mit dem die frequenzabhängigen Kopplungsinduktivitäten zwischen den Wicklungslagen von Hochstromwandlern berechnet werden können.



(a) Schnittansicht



(b) Darstellung in Rotationsachse mit Einteilung in acht Lagenbereiche

Bild 1: Schematische Darstellung eines Hochstromwandlers mit  $n = 3$  Lagen.

Durch Anwendung des Durchflutungsgesetzes und Ausnutzen von Symmetrien lässt sich das magnetische Feld innerhalb der Kernisolierung und der Isolierung zwischen den Wicklungslagen mit Hilfe einfacher Gleichungen beschreiben.

ben. Zur einfachen Beschreibung des magnetischen Feldes in den einzelnen Lagenbereichen (Bild 1b) werden geeignete Koordinatensysteme verwendet. Die magnetische Feldverteilung im inneren (i), äußeren (a), oberen (o) und unteren (u) Bereich der Wicklungslagen lässt sich mathematisch am einfachsten durch Verwendung eines Zylinderkoordinatensystems beschreiben. Zur Beschreibung der Feldverteilung in den Eckbereichen (E1-E4) wird hingegen ein toroidales Koordinatensystem verwendet.

Um die Feldverdrängungseffekte innerhalb der Windungen bei höheren Frequenzen vereinfacht abbilden zu können, wird zur Beschreibung der magnetischen Feldverteilung innerhalb der Windungen die analytische Lösung der eindimensionalen Helmholtzgleichung des magnetischen Feldes genutzt.

Aus den Gleichungen der magnetischen Feldverteilung innerhalb des Hochstromwandlers werden allgemeine Beschreibungsgleichungen für die magnetische Feldenergie  $\underline{W}_{m1\nu}$  in der Lagenisolierschicht und die Feldenergie  $\underline{W}_{mW\nu}$  innerhalb der Windungen der  $\nu$ -ten Lage bestimmt. Die magnetische Feldenergie  $\underline{W}_{mK}$  innerhalb des Kerns des Hochstromwandlers lässt sich aus den Parametern des klassischen Transformator-Ersatzschaltbildes des betrachteten Hochstromwandlers bestimmen. Die gesamte magnetische Feldenergie  $\underline{W}_m$  innerhalb des Hochstromwandlers ergibt sich dann als Summe der Energien in allen  $n$  Sekundärlagen und der Energie innerhalb des Wandlerkerns.

$$\underline{W}_m = \sum_{\nu=1}^n (\underline{W}_{m1\nu} + \underline{W}_{mW\nu}) + \underline{W}_{mK} = f(I_p, I_{L1}, I_{L2}, \dots, I_{Ln}) \quad (1)$$

Bei bekannter magnetischer Feldenergie als Funktion der einzelnen felderzeugenden Ströme lassen sich die Kopplungsinduktivitäten der Leiter durch Differentiation der Feldenergiefunktion bestimmen [1]. Angewandt auf die Feldenergie innerhalb eines Hochstromwandlers berechnet sich die Gegeninduktivität  $L_{pL\xi}$  zwischen dem Primärleiter und der  $\xi$ -ten Sekundärlage, die Gegeninduktivität  $L_{L\xi L\zeta}$  zwischen der  $\xi$ -ten und der  $\zeta$ -ten Sekundärlage, sowie die Selbstinduktivität  $L_{L\xi}$  der  $\xi$ -ten Sekundärlage durch (2).

$$L_{pL\xi} = \frac{\partial \underline{W}_m}{\partial I_p \partial I_{L\xi}} \quad L_{L\xi L\zeta} = \frac{\partial^2 \underline{W}_m}{\partial I_{L\xi} \partial I_{L\zeta}} \Big|_{\xi \neq \zeta} \quad L_{L\xi} = \frac{\partial^2 \underline{W}_m}{\partial I_{L\xi}^2}. \quad (2)$$

Mit Hilfe der berechneten Kopplungsinduktivitäten lassen sich die induzierten Spannungen  $\underline{U}_{iL1}, \underline{U}_{iL2}, \dots, \underline{U}_{iLn}$  in den einzelnen Lagen berechnen:

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_{iL1} \\ \underline{U}_{iL2} \\ \vdots \\ \underline{U}_{iLn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{pL1} \\ L_{pL2} \\ \vdots \\ L_{pLn} \end{pmatrix} j\omega I_p + \begin{pmatrix} L_{L1} & L_{L1L2} & \cdots & L_{L1Ln} \\ L_{L2L1} & L_{L2} & \cdots & L_{L2Ln} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{LnL1} & L_{LnL2} & \cdots & L_{Ln} \end{pmatrix} j\omega \begin{pmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ \vdots \\ I_{Ln} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

[1] G. Wunsch, H.-G. Schulz, *Elektromagnetische Felder*. 2. Auflage. Verlag Technik, Berlin 1996.

## Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Planung und Betrieb von Netzen“



Rengin Idil Cabadag, M.Sc.

### The Voltage Control for Reactive Power Management by Decentralized Wind Farms

Wind Farms (WFs) are often connected to the 110 kV-sub-transmission-grid. They have to contribute to the reactive power balance on the sub-transmission or transmission grids by means of reactive power management .

The main issue related to reactive power management is to provide the exact amount of reactive power at connection points (CPs). This is a novel approach compared to many known studies in literature. In order to achieve that target, the voltage control techniques of WFs are considered on a typical German 110 kV-sub-transmission grid shown in Figure I.

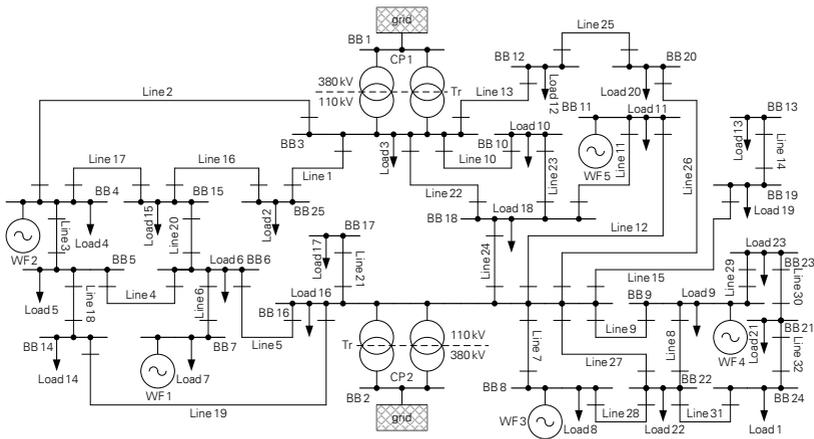


Figure I: Realistic Sub-Transmission Grid used for the Case Study.

The provision of reactive power can be realized via voltage control mode ( $P(V)$ ) WFs or power factor control mode ( $P(Q)$ ) WFs as below:

1.  $P(Q)$  WFs: The reactive power of WF is based on a set power factor within PQ diagrams.
2.  $P(V)$  WFs: WFs try to keep the voltage magnitude constant at buses where they are connected.

$P(V)$  WFs can compensate reactive power consumption of the sub-transmission grids and can regulate the operation voltage. The voltage impact of  $P(Q)$  WFs on the sub-transmission grids can be neglected. The selected WFs pro-

viding the exact amount of reactive power to be transferred into transmission grid or absorbed by sub-transmission grid have to work at  $P(Q)$  mode. In order to find the optimal operation of the sub-transmission grid, which allows voltage control and desired reactive power at CP, linearly decreasing Particle Swarm Optimization (PSO) has been implemented. The required amount of reactive power can be defined at CPs directly by system operators. In this scope, Figure II shows that reactive power support could be sufficient for a stable grid when WFs are at their reference voltages. The Reactive Power Management problem is defined by (1) :

$$V_{Gi} = \text{const.} \quad Q_{\text{function}} = \min \left( |Q_{\text{CPs}}| + \sum_{i=1}^{N_B} e^{|V_{Bi}-1|} \text{penalty} \right) \quad (1)$$

where  $V_{Gi}$  is the reference voltages of P(V) WFs,  $Q_{\text{CPs}}$  is reactive power at CPs,  $N_B$  is total number of load (PQ) buses,  $V_{Bi}$  is voltage magnitude of  $i^{\text{th}}$  PQ bus. Moreover, objective functions should be considered under (in)- equality constraints. Equality constraints in (2) and (3) are load flow equations where  $P_{Gi}$  and  $Q_{Gi}$  are generated active and reactive powers,  $P_{Li}$  and  $Q_{Li}$  are demanded active and reactive powers of  $i^{\text{th}}$  WF,  $N_L$  is total number of lines and *penalty* is an arbitrary number.

$$P_{Gi} - P_{Li} - V_i \sum_{j=1}^{N_L} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (2)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} - V_i \sum_{j=1}^{N_L} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (3)$$

The inequality constraints are limitations on  $P_{Gi}$ ,  $Q_{Gi}$ ,  $V_{Gi}$  and transformer tap positions ( $T_i$ ).  $P(V)$  WFs were considered as reactive power sources to provide reactive power support to sub-transmission or transmission grid. The voltage control during the operation can be quickly realized by PSO. Moreover,  $P(Q)$  WFs selected close to CPs were realized as reactive power sources to generate exact amount of reactive power to be transferred into transmission grid or absorbed by sub-transmission grid. In other words, the used method shows how efficiently grid operators can benefit from the  $P(V)$  WFs to provide reactive power balance on the grid.

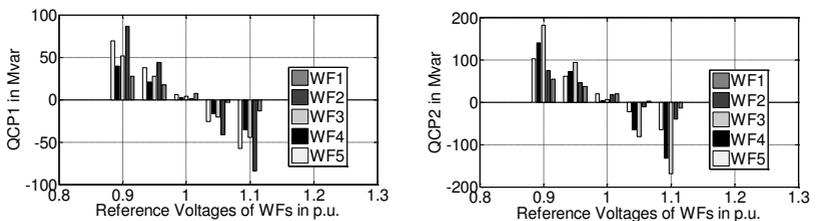


Figure II: Theoretical Reactive Power Effect at CPs based on Reference Voltages of  $P(V)$  WFs.



Jörg Dickert, Dr.-Ing.

### Bisherige Verbrauchsreduzierungen und technische Entwicklungsperspektiven von Haushaltsgeräten

#### Überblick der bisherigen Verbrauchsreduzierungen

Deutliche Verbrauchsreduzierungen bei Haushaltsgeräten konnten in den letzten Jahrzehnten erzielt werden. Sie sind in Tabelle I für verbrauchsintensive Haushaltsgeräte zusammengefasst. Vergleichsgröße ist der spezifische Energieverbrauch  $W_s$ , welcher sich immer auf eine standardisierte Anwendung bezieht. Dies ist beim Kühlen der Energieverbrauch per 100l Nutzinhalt in 24 h und bei Backöfen, Geschirrspül- und Waschmaschinen sowie Wäschetrocknern typische Standardprogramme mit Standardbeladung. Die Reduzierungen des spezifischen Energieverbrauchs betrug in den letzten vier Jahrzehnten bei den meisten Geräten weit über 80 %. Diese sind dabei größtenteils nicht auf Innovationssprünge zurückzuführen. Die genutzten Potenziale waren bereits in den 1970er Jahre bekannt [1], [2].

Tabelle I: Verbrauchsreduzierungen von Haushaltsgeräten

Geräte	Standard-Zyklus	$W_s$ in kWh		
		1978	1996	2015
Kühlschränke	per 100l Nutzinhalt in 24 h (DIN EN 153, DelVO (EU) Nr. 1060/2010)	0,90	0,54	< 0,06
		100 %	60 %	7 %
Gefrierschränke/ Gefriertruhen	per 100l Nutzinhalt in 24 h (DIN EN 153, DelVO (EU) Nr. 1060/2010)	1,1	0,50	< 0,12
		100 %	45 %	11 %
Kühl-Gefriergeräte			0,55	< 0,12
			100 %	22 %
Backöfen	bei Standardbeladung (DIN EN 50304, VO (EU) Nr. 65/2014)	1,5	1,1	0,63
		100 %	73 %	42 %
Geschirrspülma- schinen	per Spülgang und Maßgedeck (DIN EN 5024, DelVO (EU) Nr. 1059/2010)	0,21	0,10	< 0,06
		100 %	48 %	29 %
Waschmaschinen	per kg Wäsche (DIN EN 60456, DelVO (EU) Nr. 1061/2010)	0,42	0,20	< 0,07
		100 %	48 %	17 %
Wäschetrockner	per kg Wäsche (DIN EN 61121, DelVO (EU) Nr. 392/2012)	0,90	0,61	< 0,14
		100 %	68 %	16 %
Bereitschafts- und Aus-Zustand	pro Gerät pro Tag (VO (EG) Nr. 1275/2008)		0,24	< 0,024
			(10 W)	(< 1 W)
			100 %	10 %

## Ausblick für weitere Verbrauchsreduzierungen

Im Weiteren sollen zukünftige Potenziale zu Effizienzsteigerungen aufgezeigt werden.

### *Effizienzsteigerungen bei Wasch- und Geschirrspülmaschinen*

Trotz der bisherigen Verbrauchsreduzierungen sind weiterhin Potenziale bei der Prozessoptimierung zu finden. Dabei wird ein Optimum zwischen, Zeitdauer des Programmablaufs, Einsatz von chemischen Reinigungsmitteln, Mechanik des Geräts und Temperatur gesucht. Problematisch dabei ist das Zusammenspiel zwischen Geräte- und Waschmittelhersteller sowie den Gewohnheiten der Benutzer. Durch die verbesserte Wirkung der Waschmittel haben heutzutage Waschgänge mit niedrigeren Temperaturen eine ähnlich gute Wirkung wie die Kochwäsche. Der Informationsbedarf für Benutzer zur richtigen Nutzung ist groß. Dem trägt beispielsweise der „Industrieverband Körperpflege- und Waschmittel“ durch das „Forum Waschen“ Rechnung.

Bei den Wäschetrocknern hat sich die Wärmepumpen-Technologie in den letzten Jahren durchgesetzt. Auch für Geschirrspül- und Waschmaschinen ist die Verwendung dieser Technologie in der Entwicklung und kann zu weiteren deutlichen Reduzierungen des Energieverbrauchs führen.

### *Reduzierung des Verbrauchs für Aus- und Bereitschaftszustand*

Beim Aus-Zustand ist das Gerät mit dem Netz verbunden, stellt aber keine Funktion bereit. Im Bereitschaftszustand ist das Gerät auf das Stromnetz angewiesen und erfüllt noch wenigstens eine Funktion, wie z. B. die Reaktivierungsfunktion oder eine Statusanzeige. Die Europäische Union hat mit der Verordnung (EU) 1275/2008 Ökodesign-Anforderungen festgelegt, womit die Leistungsaufnahme die folgenden Werte seit 2013 nicht überschreiten darf:

- 0,50 W ⇒ im Aus-Zustand
- 0,50 W ⇒ nur Reaktivierungsfunktion
- 1,00 W ⇒ Reaktivierungsfunktion und Statusanzeige

### *Halbleiterelektronik*

Die Halbleiterelektronik umfasst die Mikroelektronik als auch Nanoelektronik. Weiterentwicklungen haben besonders auf Unterhaltungsgeräte und Geräte für Büro & Kommunikation einen massiven Einfluss. Die Entwicklungen sind dabei vielschichtig und umfassen die Technologieknoten mit den jeweiligen Strukturgrößen, die sich zurzeit bei 22 nm befinden. Kleinere Strukturgrößen bedeuten auch einen geringeren Energieverbrauch zur Informationsverarbeitung. Effizienzsteigerungen können daher weiterhin erwartet werden. Ein Beispiel für die Vielschichtigkeit ist das Spitzencluster „Cool Silicon – Energy Efficiency Innovations from Silicon Saxony“.

- [1] B. Stoy, U. Kionka: *Senkung des Stromverbrauchs von Elektro-Großgeräten im Haushalt*. Energiewirtschaftliche Tagesfragen (Ausgabe 27), 1977
- [2] Helmut Lotz, *Energieverbrauch bei Haushaltsgeräten: erreichte Einsparungen und weitere Potentiale*. Campus-Verlag, Frankfurt/Main 1996

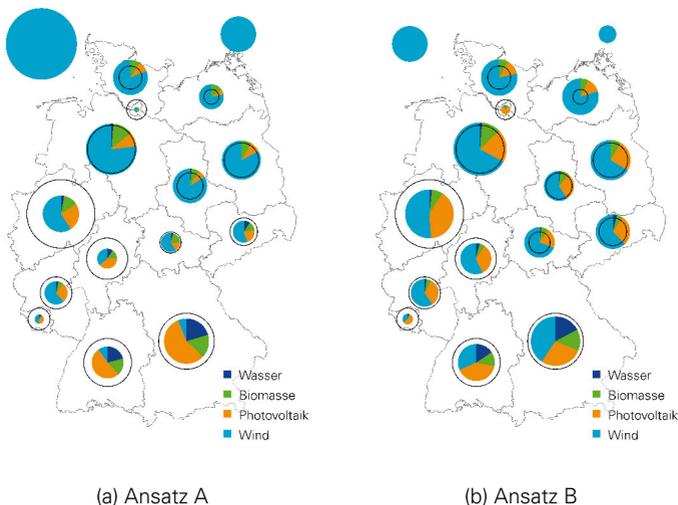


Niels Erdmann, Dipl.-Ing.

### Abschätzung des Energietransportbedarfs bei ausschließlicher Einspeisung aus erneuerbaren Energiequellen

Bei der Umsetzung der Energiewende stand in den letzten Jahren insbesondere die elektrische Energieversorgung im Fokus. Mit einem Anteil von 27,8 % im Jahr 2014 trugen die erneuerbaren Energien (EE) erheblich zur Bereitstellung bei. Die hier vorgestellte Untersuchung [1] geht von einem erhöhten Nettopedarf an elektrischer Energie von 700 TWh/a aus. Dieser soll vollständig durch in Deutschland installierte EE-Anlagen bereitgestellt werden. Es wurden zwei Ansätze untersucht, wie eine zukünftige Energiebereitstellung verteilt sein kann und welcher Energieübertragungsbedarf sich daraus ergibt.

Dazu wird Deutschland in 16 Regionen unterteilt. Diese entsprechen überwiegend den Bundesländern. Lediglich Berlin und Brandenburg sowie Bremen und Niedersachsen werden zusammengefasst. Hinzu kommen noch Nord- und Ostsee (siehe Bild I). Jede dieser Regionen hat einen Energiebedarf und kann Energie selbst bereitstellen. Benachbarte Regionen sind zum Energieausgleich durch Verbindungskorridore miteinander verbunden.



(a) Ansatz A

(b) Ansatz B

Bild I: Energiebedarf (Kreislinie) und -bereitstellung (Kreisdiagramm)

Beiden Ansätzen sind sowohl der Energiebedarf als auch die Energiebereitstellung durch Wasserkraft und Biomasseanlagen gemein. Im Ansatz A (Bild Ia) werden 50 GW Offshore-Windenergieanlagen in Nord- und Ostsee angenom-





Sebastian Kraemer, Dipl.-Ing.

### Verbesserte Blindleistungsbereitstellung durch dezentrale Erzeugungsanlagen im Niederspannungsnetz

Der umfangreiche Zubau dezentraler regenerativer Energieerzeuger kann zu einer Umkehr des Lastflusses zwischen allen Spannungsebenen führen, beginnend in stark mit Photovoltaikanlagen (PVA) durchdrungenen Niederspannungsnetzen [1]. In Folge dessen kommt es vor allem in ländlichen und vorstädtischen Gebieten zu Spannungsbandverletzungen. Um den teuren Netzausbau zu vermindern, sollen sich auch PVA durch die Regelung ihrer Blindleistung an der Spannungshaltung beteiligen.

Bisher bewährte Regelstrategien wie  $\cos\varphi(P)$  und  $Q(\Delta u)$  prägen das Betriebsverhalten jeder einzelnen Anlage lediglich gleich. Ein neuer adaptiver Regelansatz, der die Gesamtwirkung im Netz berücksichtigt, muss daher eine übergeordnete Koordinierung enthalten. Die Umsetzung soll sich durch Autonomie (keine Fernwirktechnik) und eine Optimierung gegenüber den statischen ortsunabhängigen Blindleistungsregelungen hervorheben. Um die Effektivität (Bewertungsgrößen: Spannungshub, Verluste) der Blindleistungsbereitstellung in Abhängigkeit von der netztopologischen Charakteristik des Netzanschlusspunktes der PVA zu bewerten, erfolgten exemplarische Untersuchungen an realitätsnahen Niederspannungsnetzen. Ebenso konnte eine Bewertung des relativen Anschlussortes durch eine Bestimmung der vorgelagerten Netzimpedanz bzw. des jeweiligen  $R/X$ -Verhältnisses erreicht werden. Bild I zeigt darauf aufbauend eine Empfehlung für die Kennlinienparameter ortsadaptiver und verlustreduzierter  $Q(\Delta u)$ -Regelungen.

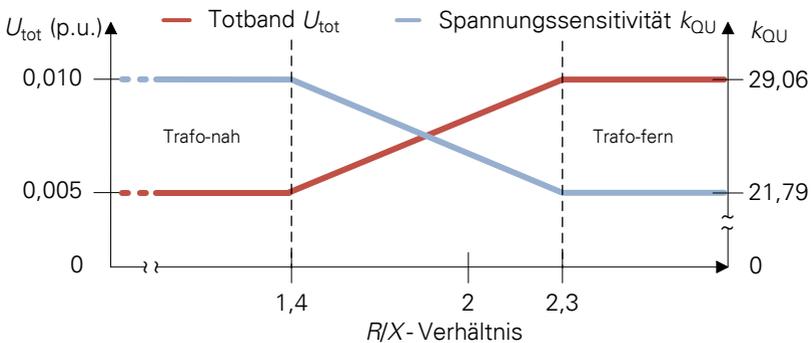


Bild I: Selbstständige Parametrierung des Reglers in Abhängigkeit des  $R/X$ -Verhältnisses

Im Falle eines hohen Spannungssensitivitätsfaktors erfolgt die maximale Blindleistungsbereitstellung innerhalb einer Spannungsänderung von 2 %. Das neuartige adaptive Regelungskonzept  $Q(\Delta u, Z)$  ist eine klassische  $Q(\Delta u)$ -Regelung mit der Erweiterung um eine impedanzabhängige Parametrierung (Bild II). Nachfolgende Merkmale sichern eine möglichst effektive Beteiligung aller PVA eines Netzgebietes an der Blindleistungsbereitstellung:

- Trafo-nahe Anlagen beginnen die Bereitstellung von Blindleistung bei einer lokal niedrigeren Spannung als Trafo-ferne Anlagen.
- Jede PVA misst periodisch das  $R/X$ -Verhältnis der für sie elektrisch wirksamen Netzimpedanz.
- Die Reglerparametrierung einer jeden PVA erfolgt zeitlich gestaffelt in Abhängigkeit des aktuell lokal gemessenen  $R/X$ -Verhältnisses.
- Als sinnvolle Regelgröße verbleibt aufgrund der notwendigen Autonomie der Anlagenregelung weiterhin die gemessene Spannung am Anschlusspunkt der PVA.

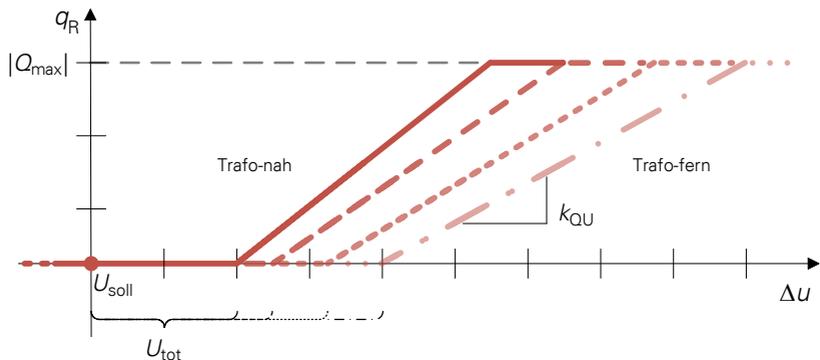


Bild II: Netzimpedanzabhängiges Kennlinienfeld einer  $Q(\Delta u, Z)$ -Regelung

In simulativen Untersuchungen an einem repräsentativen Niederspannungsnetz im Netzberechnungsprogramm DigSILENT PowerFactory bestätigten sich die erwarteten Vorteile gegenüber einer starr parametrisierten  $\cos\varphi(P)$ - als auch  $Q(\Delta u)$ -Regelung. Es konnte demnach ein vorläufiges Optimum bezüglich Blindleistungsbedarf, der Verluste und maximal einspeisbarer Energie gefunden werden, ohne Nachteile für den Netzbetrieb (Spannungshaltung) zu verursachen. Für ein globales Optimum sind weitergehende Untersuchungen unter Einbeziehung von geeigneten Optimierungsalgorithmen, wie der Mean Variance Mapping Optimization, anzustreben.

[1] International Solar Energy Society, German Section (DGS), *Die Karte der Erneuerbaren Energien*. [Online] <http://www.energymap.info>, Abruf: 31.03.2015



**Marcus Kreuztizer, Dipl.-Ing.**

#### **Koordinierte Bereitstellung von Systemdienstleistungen aus 110-kV-Verteilnetzen**

Im Zuge der Energiewende erfolgt der Zubau regenerativer dezentraler Erzeugungsanlagen (DEA) zum Großteil in den Verteilnetzen. Dies führt zu einer Reduzierung verfügbarer konventioneller Kraftwerksleistung im Übertragungsnetz (ÜN) und somit zu veränderten Anforderungen bei der Bereitstellung von Systemdienstleistungen unter Einbeziehung von Verteilnetzen (VN). Im Forschungsprojekt SysDL 2.0 gilt es zu untersuchen, in welchem Maße 110-kV-Verteilnetze Beiträge zu den Systemdienstleistungen koordiniert leisten können. Aufgabe ist es, Algorithmen in die Betriebsführung ausgewählter Verteilnetzgruppen zu integrieren und die Funktionalität in einem Feldtest nachzuweisen.

Zum Erreichen der Zielstellung wurden zunächst sechs verschiedene Anwendungsfälle (A bis F) in Anlehnung an das 10-Punkte-Programm der Verteil- und Übertragungsnetzbetreiber der 50 Hertz Regelzone durch das Projektkonsortium identifiziert [1]. Für diese soll das zu entwickelnde „SysDL-Modul“ optimierte Arbeitspunkte der DEA im VN bestimmen. Die Anwendungsfälle A bis C werden vom Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) und D bis F vom Verteilnetzbetreiber (VNB) vorgegeben. Innerhalb der zwei Gruppen wird zusätzlich eine Unterscheidung in Spannungshaltung und Blindleistungsbereitstellung sowie Redispatch und Engpassmanagement vorgenommen. Die Beschreibung der Anwendungsfälle ist folgend sowie der schematische Ablauf zur Kategorie Spannungshaltung und Blindleistungsbereitstellung in Bild I dargestellt [2].

**A - Aufweitung des Spannungsbands am Netzverknüpfungspunkt (NVP):**  
Droht eine Verletzung vereinbarter Spannungsbänder am NVP zwischen VN und ÜN soll die maximal mögliche Erweiterung dieser Spannungsbänder ermittelt werden. Auf Basis der anschließenden Sollwert-Vorgabe des ÜNB werden die notwendigen Arbeitspunkte an den DEA berechnet und eingestellt.

**B - Blindleistungsanforderung aus dem Verteilnetz:**

Ist Anwendungsfall A nicht zielführend, kann durch den ÜNB eine direkte Blindleistungsvorgabe an den VNB gestellt werden. Wiederum soll durch das SysDL-Modul die maximal möglichen Blindleistungsgrenzen ermittelt und nach Sollwert-Vorgabe durch den ÜNB die notwendigen Arbeitspunkte an den DEA berechnet und eingestellt werden.

**C - Prüfung von Redispatch-Anfragen des ÜNBs:**

Anfragen zur Abregelung von Kraftwerken auf der Verteilnetzebene sollen von den betroffenen VNB geprüft und freigegeben bzw. abgelehnt werden.

**D - Lokale Spannungshaltung im VN:**

Droht im VN eine lokale Spannungsbandverletzung, soll das vorhandene Blindleistungspotenzial der DEA genutzt werden, um diese zu vermeiden bzw. so gering wie möglich zu halten.

**E - Minimierung der Netzverluste im 110 kV-Netz:**

Werden durch Anwendungsfall A, B, D keine konkreten Vorgaben gemacht oder sind nach deren Einhaltung noch Blindleistungspotenziale vorhanden, werden diese genutzt, um die Netzverluste im VN zu minimieren.

**F - Lokales Engpassmanagement im VN:**

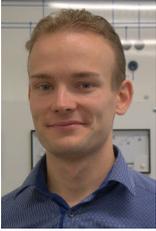
Es soll untersucht werden, ob durch gezielte Blindleistungsbereitstellung eine Reduktion von Netzengpässen erreicht und somit eine Abregelung der Wirkleistung von DEA vermindert werden kann.



Bild I: Anwendungsfälle zur koordinierten Blindleistungsbereitstellung

Auf dieser Basis sind Algorithmen auszuwählen und weiterzuentwickeln, welche sowohl die Vorgaben durch die Anwendungsfälle als auch die Nichtlinearität der in jedem Fall zu lösenden Lastflussberechnungen beherrschen. Viersprechend sind dabei Heuristiken, wie die Particle Swarm Optimierung oder die Mean Variance Mapping Optimierung. Diese sollen hinsichtlich Funktionalität, Leistungsfähigkeit und Robustheit mit dem etablierten Optimal Power Flow verschiedener Netzberechnungsprogramme als auch einem selbst entwickelten „Regel-basierenden“ Ansatz verglichen werden.

- [1] *10-Punkte-Programm der 110-kV-Verteilnetzbetreiber und des Übertragungsnetzbetreibers der Regelzone 50 Hertz*; [online] [http://www.50hertz.com/Portals/3/Content/Dokumente/Medien/Positionspapiere/10\\_Punkte\\_Programm\\_Systemsicherheit-Langfassung.pdf](http://www.50hertz.com/Portals/3/Content/Dokumente/Medien/Positionspapiere/10_Punkte_Programm_Systemsicherheit-Langfassung.pdf), Abruf: 26.10.2015
- [2] *Technische Anwendungsszenarien*, [online] <http://www.sysdl20.de/ergebnisse/>, Abruf: 15.10.2015



Tobias Schnelle, Dipl.-Ing.

## Modulare Netze zur Ansteuerung dezentraler Anlagen mittels Frequenzsignal

Während die installierte Leistung der im Verteilnetz zugebauten dezentralen Energieanlagen (DEA) in den vergangenen Jahren kontinuierlich gestiegen ist, nimmt die Anzahl der am Netz vorhandenen Großkraftwerke stetig ab. Um den sicheren Betrieb der teilweise hoch ausgelasteten Netze zu gewährleisten, ist es für Verteilnetzbetreiber (VNB) zukünftig notwendig, dezentrale Einspeiser, steuerbare Lasten und Speichersysteme zielgerichtet in die Erbringung von Systemdienstleistungen einzubinden. Der Einsatz modularer Netze (MN), bei denen die Verbindung zum vorgelagerten Netz über eine leistungselektronische Netzkupplung (eNK) hergestellt wird, bietet hier eine Möglichkeit zur kostengünstigen Informationsübertragung [1].

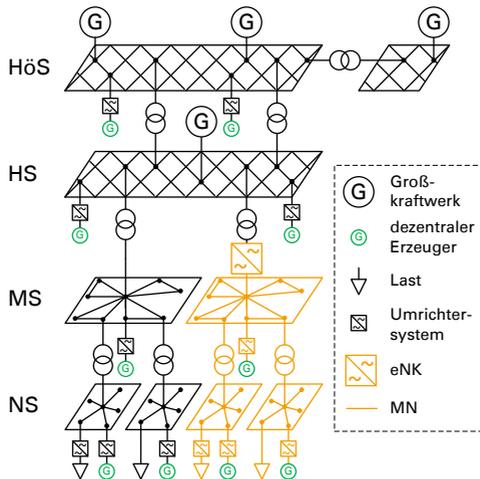
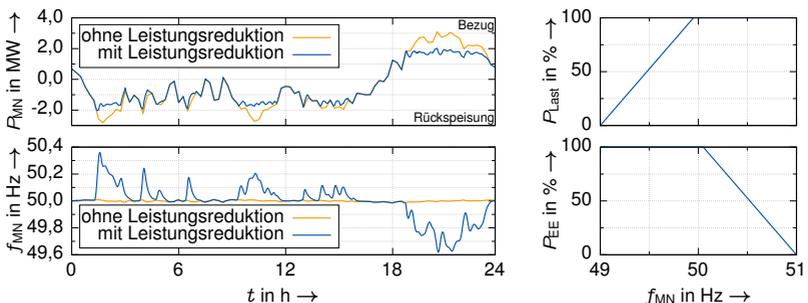


Bild I: Elektroenergiesystem mit MN ab der Mittelspannungsebene, gebildet durch die eNK

Bild I zeigt den Aufbau eines MNs ab der Mittelspannungsebene mit Hilfe einer eNK. Das orange dargestellte MN besitzt eine Wirkleistungsverbindung zum vorgelagerten Netz, wird jedoch frequenzentkoppelt betrieben. Da der Anteil synchron verbundener Motoren im Mittel- und Niederspannungsnetz als vernachlässigbar angenommen werden kann, kann die Frequenz in technischen Grenzen frei vorgegeben werden. Da sie im gesamten MN gleich und mit einfachen technischen Mitteln zu bestimmen ist, eignet sie sich als kostengünstiger und hochverfügbarer Kommunikationskanal.

Als zu übertragende Daten sind unter anderem marktbasiertere Informationen (aktueller Strompreis) sowie netzbasierte Informationen (Ampelphasen nach BDEW-Ampelmodell, aktuelles Netznutzungsentgelt und direkte Stellbefehle für Erzeuger, Lasten und Speicher) denkbar. So wird allen angeschlossenen Endkunden eine einfache technische Möglichkeit geboten, sich kostenoptimal (marktbasiertere Informationen) oder netzdienlich (netzbasierte Informationen) zu verhalten. Durch die geeignete Kombination beider Signalvarianten mithilfe der Ampelphase (in der grünen Phase werden Marktsignale übertragen, in der gelben und roten Netzsignale) ist sowohl ein kosten- als auch netzoptimaler Betrieb des Energieversorgungsnetzes möglich. Über eine Modulation des Frequenzsignals ist zudem die Übertragung mehrerer Informationen innerhalb eines geeigneten Zeitfensters denkbar. Der Rückkanal zum Nachweis und zur Abrechnung des tatsächlich erbrachten Verhaltens kann wesentlich geringeren Anforderungen hinsichtlich Ausfallsicherheit und Echtzeitfähigkeit genügen. So ist eine einmalige Informationsübertragung pro Abrechnungsintervall ausreichend.

Das Verhalten eines MNs bei Vorgabe direkter Stellbefehle ist in Bild II dargestellt. Bild IIa zeigt den Wirkleistungsverlauf über die eNK. Durch Vorgabe eines entsprechenden Frequenzsignals und Hinterlegen der in Bild IIb dargestellten Kennlinien in der Regelung von Lasten und Einspeisern kann der Leistungsaustausch von  $P_{MN} = \pm 3 \text{ MW}$  auf  $P_{MN} = \pm 2 \text{ MW}$  begrenzt werden. Dadurch ist die eNK auf einen geringeren Leistungsbereich dimensionierbar. Der durch die Frequenz beeinflussbare Wirkleistungshaushalt kann durch den VNB zur Erbringung von Systemdienstleistungen, z. B. Frequenzhaltung, Betriebsführung und Schwarzstart, eingesetzt werden.



(a) Wirkleistungs- und Frequenzverlauf

(b) Frequenzverhalten

Bild II: Beeinflussung der Wirkleistungsbilanz innerhalb des MNs durch Vorgabe eines geeigneten Frequenzsignals

- [1] T. Schnelle, M. Schmidt, P. Schegner, *Power Converters in Distribution Grids—New Alternatives for Grid Planning and Operation*. PowerTech Conference, Eindhoven 2015.

## Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Power Quality“

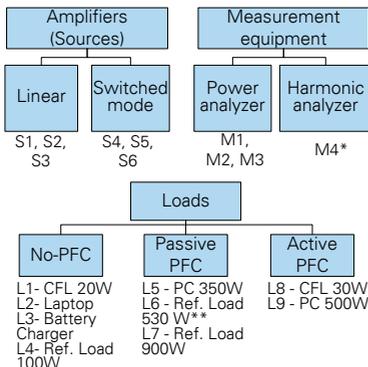


Ana Maria Blanco, M.Eng.

Harmonic Emission of Home Appliances

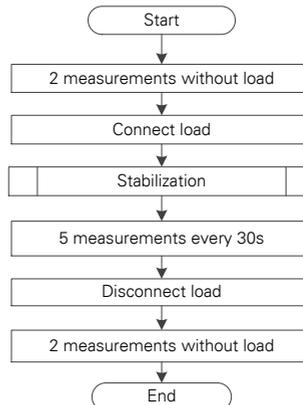
In order to declare CE conformity, electronic devices for the EU market have to meet the harmonic emission limits according to IEC 61000-3-2. The required measurement set-up consists of a programmable voltage source providing a sinusoidal supply voltage, the measurement equipment, the tested load and inter-connecting wires/impedances. The reproducibility of measurement results can be affected by differences between measurement equipment, slight changes in the operating point of the load or different levels of interaction between the load and the voltage source. The main objective of this research is to identify the impact of different voltage sources, measurement equipment and loads on the accuracy of the harmonic current measurements. Moreover, the suitability of a verification of the whole measurement system based on reference loads is evaluated.

Different measurement setups were arranged in order to identify the impact of the components (voltage source and measurement equipment) on the measurements of several non-linear loads. Figure 1a summarizes the number and type of selected components and loads, and Figure 1b shows the measurement procedure.



\* Full compliance IEC 61000-3-2

\*\* Ref. Load of Draft IEC TR 61000-4-37



(a) Measurement setups

(b) Measurement procedure

Figure 1: Measurement setup and measurement procedure

The results of each load obtained with the different measurement setups were compared individually for each harmonic using bar charts. The bars indicate the minimum, maximum and mean value between the five measurements of the load (cf. Fig. 1b). Fig. 11 shows exemplarily the results of the 5th harmonic emission of a household appliance and a reference load. Using the results obtained with all loads, the following conclusions were derived:

- Reference loads show a better steady state behavior in comparison with household appliances, and they may be used to test measurement setups.
- Reference loads should be designed to test the possible interaction between load and voltage source.
- Measurement equipment does not have a significant impact.
- Differences in the measurements are mainly due to the interaction between the load and the source or the variation of the load itself.
- Linear amplifiers are more robust compared to switched mode amplifiers.
- In some cases the voltage distortion of the test signal produced by switch mode amplifiers exceeds the allowed levels defined in the standard IEC 61000-3-2. A continuous monitoring of voltage distortion during the harmonic emission measurement is recommended.

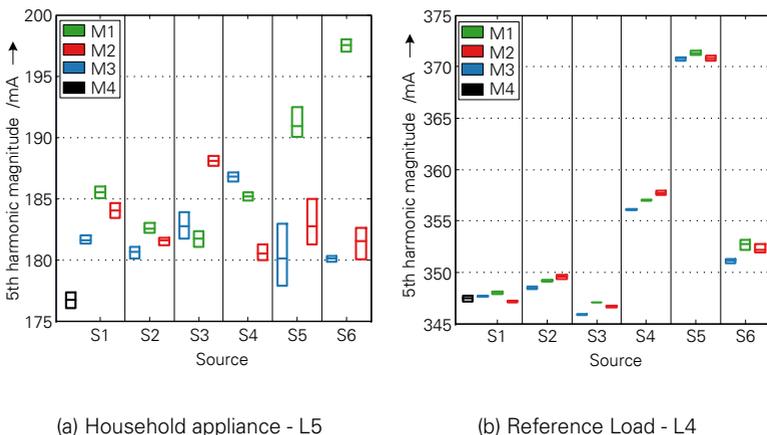


Figure 11: 5th harmonic emission of some loads

- [1] A.M. Blanco, R. Gelleschus, J. Meyer, P. Schegner, *Impact of measurement setup and test load on the accuracy of harmonic current emission measurements*. IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference. Italy, 2015.



Max Domagk, Dr.-Ing.

### Quantifizierung saisonaler Schwankungen in Kenngrößen der Strom- und Spannungsqualität

Im Verlauf der Zeitreihen von Strom- und Spannungsqualitätskenngrößen existieren mehr oder weniger stark ausgeprägte Schwankungen. Deren Ursachen liegen hauptsächlich im variierenden Verhalten von Abnehmern und Erzeugern. Je nach Beobachtungsdauer (Tage oder Wochen bis zu Jahren) können verschiedene Arten von Schwankungen unterschieden werden. Ein Beispiel dafür sind saisonale Schwankungen der Strom- und Spannungsqualität, die sich über ein Jahr erstrecken.

Grundsätzlich sind für die Untersuchung von saisonalen Einflüssen wochenweise erfasste Kenngrößen empfehlenswert. Für jede Qualitätskenngröße wird wochenweise das 95 %-Quantil der 10-Minuten-Mittelwerte entsprechend der Norm EN 50160 berechnet. Dadurch werden die für saisonale Schwankungen nicht relevanten, jedoch praktisch immer vorhandenen Schwankungen innerhalb der Tage einer Woche effektiv ausgeblendet. Die Zeitreihe in Bild I zeigt beispielhaft die Emission der 3. Stromharmonischen im Leiter L2 für ein Wohngebiet mit 377 Wohneinheiten. Insgesamt sind 201 verschiedene Wochen dargestellt, die über den Zeitraum von knapp 4 Jahren deutlich niedrigere Emissionswerte für die Zeit von Juni bis August (im Bereich der Wochen 30, 80 und 130) zeigen.

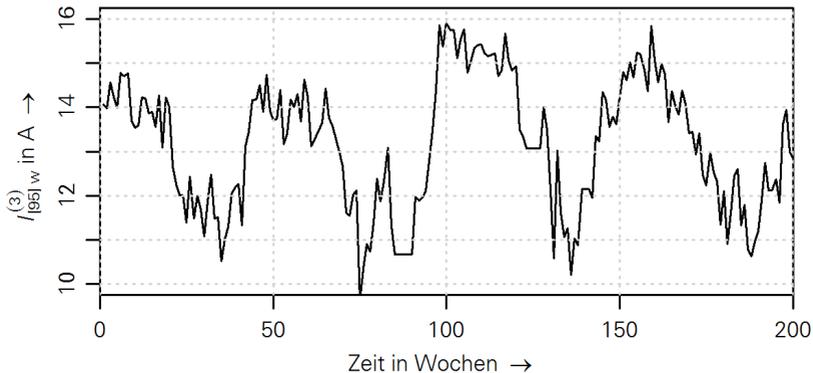


Bild I: Emission der 3. Stromharmonischen für ein Wohngebiet mit 337 Wohnungen; wochenweise berechnete 95 %-Quantile der 10-Minuten-Mittelwerte

Die Zeitreihen werden mittels diskreter Fouriertransformation im Frequenzbereich untersucht. Innerhalb eines Jahres entspricht die Amplitude der ers-

ten Spektralkomponente  $A_1$  der zu identifizierenden saisonalen Variation. Die Amplitude  $A_1$  der ersten Spektralkomponente beschreibt die Höhe der saisonalen Variation. Der Phasenwinkels  $\varphi_1$  entspricht grundsätzlich den Kalenderwochen und gibt einen Hinweis auf die Jahreszeit, in welcher die höheren Emissionswerte auftreten. Mithilfe des neu definierten Variationsindex ist eine automatisierte Bewertung der Signifikanz einer saisonalen Variation innerhalb einer Jahreszeitreihe möglich. Für das Beispiel in Bild I ergibt sich eine saisonale Variation von  $\pm 1,5A$  und ein Phasenwinkel, welcher auf höhere Emissionswerte im Dezember hinweist. In Bild II ist die Anwendung des entwickelten Verfahrens für den Stromeffektivwert und die 3. Stromharmonische verschiedener Messorte zu sehen.

Signifikante saisonale Variationen des Stromeffektivwertes in Bild IIa wurden bei 26 der 30 untersuchten Messungen identifiziert. Hinsichtlich der Abnehmerkategorie sind Unterschiede feststellbar. Die Geschäfte mit Elektronikfachmarkt (GHD) besitzen ein erhöhtes Niveau während der Wochen in den Sommermonaten, was möglicherweise auf den Einsatz von Klimaanlage zurückzuführen ist. Es ist anzumerken, dass die saisonalen Unterschiede hierbei bis zu 300 A betragen. Die restlichen Messungen zeigen hingegen ein erhöhtes Effektivwertniveau während der Wintermonate.

Eine saisonale Variation der 3. Stromharmonischen konnte nur für 33 % der Messungen identifiziert werden. Diese sind in Bild IIb dargestellt. Die Geschäfte (GHD) und die Wohngebiete (EFH/MFH) zeigen Unterschiede im Bereich 4 A und für die Bürostruktur (BUR) sind Variationen von bis zu 13 A zu beobachten. Fast alle Messungen zeigen erhöhte Emissionsniveaus in den Wintermonaten (um Januar), was auf eine erhöhte Gerätenutzung von z. B. Leuchtmitteln in der kalten Jahreszeit schließen lässt.

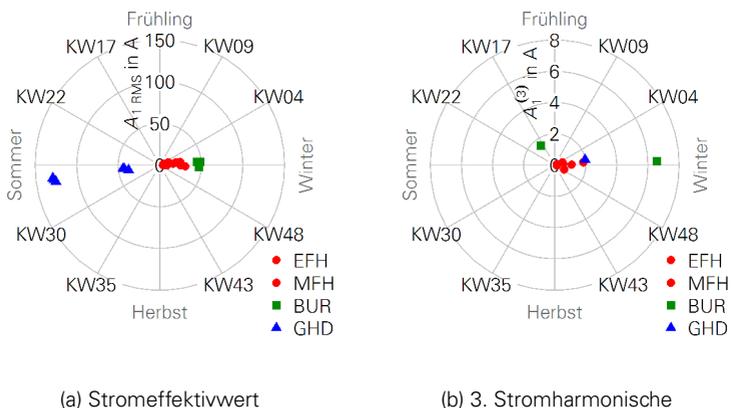


Bild II: Saisonale Variationen für Wohngebiete (EFH,MFH), Büros (BUR) und Geschäfte mit einem Elektronikfachmarkt (GHD)



Etienne Gasch, Dipl.-Ing.

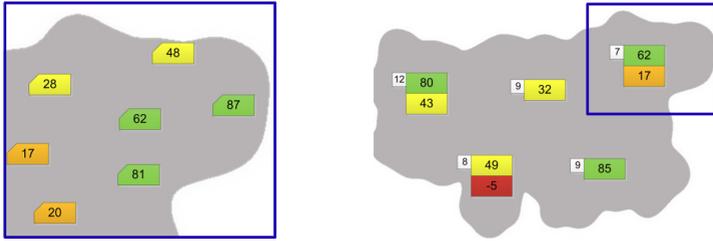
#### Darstellung des Power Quality Index in dynamischen, interaktiven Karten

Die routinemäßige Auswertung der Spannungsqualität gewinnt für Netzbetreiber immer mehr an Bedeutung. Messgeräte werden immer preiswerter und Netzbetreiber schaffen installieren mehr Messgeräte. Teilweise übernimmt auch andere Sekundärtechnik (z. B. Zähler) bereits die Aufgabe der Spannungsqualitätsmessung. Die Anzahl der Messdaten steigt stetig an und die Nachfrage nach Software zur effizienten und übersichtlichen Auswertung großer Datenmengen nimmt zu. Die von Messgeräten mitgelieferte Software ist für eine derart umfassende, messortübergreifende Auswertung häufig nicht anwendbar. Es besteht der Bedarf an neuen Auswertetools, welche dem Nutzer die Spannungsqualität flexibel und in verschiedenen Stufen zusammengefasst (aggregiert), von der Kurzübersicht bis zur Messreihe einer einzelnen Kenngröße, in einfach verständlicher Form präsentieren können. Neben der numerischen Darstellung in Tabellenform hat besonders die Integration in geographische Informationssysteme große Vorteile. Im Folgenden wird die Darstellung des Power Quality Indexes (PQI) eines gesamten Energieversorgungsnetzes in interaktiven Karten vorgestellt. Der PQI ist ein Maß für die noch vorhandene Qualitätsreserve und nimmt positive Werte an, wenn die angewendeten Grenzwerte (z. B. nach EN 50160) nicht überschritten werden.

Für die Messung der Spannungsqualität werden 83 Spannungsqualitätskenngrößen je Messort aufgenommen. Die Datenmenge erhöht sich mit der Anzahl der Messorte und der Messdauer. Zur einfacheren Veranschaulichung werden die Messdaten mittels des PQI, welcher auf Basis der wochenweise berechneten 95%-Quantile bestimmt wird, aggregiert [1]. Die Aggregation kann grundsätzlich in drei Dimensionen erfolgen (Messorte, Zeiträume, Kenngrößen). Sie kann je Messort bspw. entweder alle Spannungsqualitätskenngrößen oder nur ausgewählte Kenngrößen umfassen (Messortindex).

Durch weitere Aggregation über mehrere Messorte erhält man einen PQI für ein Netzgebiet (Netzgebietsindex) oder ein ganzes Netz (Netzindex). Zusammen mit den geografischen Koordinaten je Messort wird der PQI in einer Karte (Geoinformationssystem – GIS) dargestellt. Diese Karte stellt für den Nutzer eine einfache Übersicht über die Spannungsqualität in einem Netzgebiet dar. Zur Kartendarstellung wurden zwei Methoden entwickelt: mit variablem und festem Zoomlevel.

Die Kartendarstellung mit variablem Zoomlevel stellt je nach Zoomstufe verschiedene Ebenen der Aggregation des PQIs dar. In der höchsten Zoomstufe (Bild 1a) wird der PQI jedes Messortes einzeln dargestellt (Messortindex). Die zu aggregierenden Messortindizes werden je nach Größe in 4 Kategorien unterteilt (z. B. grün für hohe Reserve zum Grenzwert bzw. rot für kei-



(a) PQI je Messort

(b) PQI für Netzgebiete

Bild I: PQI bei unterschiedlichen Zoomlevel

ne Reserve). In niedrigeren Zoomstufen werden mehrere Messortindizes zusammengefasst (Bild Ib). Angezeigt werden maximal zwei ausgewählte Messortindizes sowie die Anzahl der zugrunde liegenden Messorte. Im Beispiel (Bild Ib) werden die sieben blau eingerahmten Messortindizes aus Bild Ia zusammengefasst. Es werden jeweils der niedrigste Messortindex der besten und schlechtesten Kategorie dargestellt.

In der Kartendarstellung mit festem Zoomlevel (Bild II) werden automatisch Regionen mit ähnlichen Messortindizes zusammengefasst. Für die Aggregation wird die Clusteranalyse verwendet. Als Eingangsparameter werden in entsprechender Wichtung die Entfernung der Messorte untereinander und die jeweiligen Messortindizes verwendet. Die Größe der Kreise in Bild II korrespondiert mit der Anzahl der Messorte, die darin aggregiert wurden. Die Zahl im Kreis ist der aggregierte Netzgebietsindex.

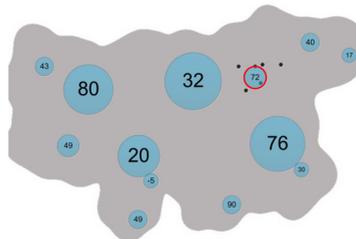


Bild II: PQI durch Aggregation über Clusteranalyse

[1] E. Gasch et. al. *Efficient power quality analysis of big data*. CIREN, France 2015.



Matthias Klatt, Dipl.-Ing.

### Entwurf eines Filters für die Messung von supraharmonischer Verzerrung im öffentlichen Niederspannungsnetz

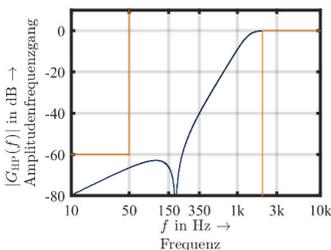
Die Zunahme der Spannungs- und Stromverzerrung im Frequenzbereich von 2 kHz bis 150 kHz sowie die daraus folgende zunehmende Zahl von Störungen, unterstreichen die Dringlichkeit der Einführung von Normen zur Wahrung der elektromagnetischen Verträglichkeit in diesem Frequenzbereich. Die Entwicklung dieser Normen erfordert die Festlegung eines einheitlichen Messverfahrens, mit dem genaue, verlässliche und reproduzierbare Messergebnisse erzielt werden können.

Eine Voraussetzung für ein solches Messverfahren ist die Verwendung von geeigneten Signalfiltern, welche einerseits im zu untersuchenden Frequenzbereich eine hohe Genauigkeit erzielen, andererseits alle anderen Spektralkomponenten wirksam reduzieren. Dazu zählt insbesondere die Unterdrückung der Grundschwingung und ihrer Harmonischen in Messsignalen aus dem öffentlichen Elektroenergieversorgungsnetz.

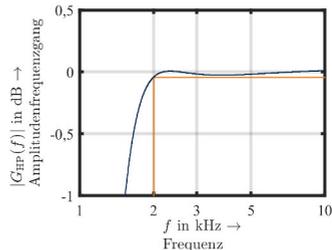
Am IEEH wurde ein entsprechendes Filter für Messungen im Frequenzbereich 2 kHz bis 150 kHz entwickelt. Es dämpft die Grundschwingung bei 50 Hz um 60 dB (mehr als Faktor 1000) und weist im Durchlassbereich oberhalb 2 kHz eine Abweichung von weniger als  $\pm 0,5\%$  auf. Diese Forderungen sind strenger als die des Filtervorschlags aus [2]. Die Übertragungsfunktion des optimierten Filters lautet

$$G_{HP}(s) = \frac{1,259 \cdot 10^{-12} \cdot s^3 + 1,631 \cdot 10^{-6} \cdot s}{1,249 \cdot 10^{-12} \cdot s^3 + 2,2 \cdot 10^{-8} \cdot s^2 + 1,855 \cdot 10^{-4} \cdot s + 1} \quad (1)$$

Der Amplitudenfrequenzgang mit den Entwurfsgrenzen ist im Bild I dargestellt.



(a) Grenze im Sperrbereich



(b) Grenze im Durchlassbereich

Bild I: Amplitudenfrequenzgang und angestrebte Grenzen

Aus der Übertragungsfunktion kann entweder eine analoge Schaltung oder eine Berechnungsvorschrift für ein Digitalfilter abgeleitet werden. Das Filter wurde als Analogschaltung aufgebaut. Das Ersatzschaltbild mit Parametern und ein Foto der fertigen Schaltung sind in Tabelle I und den Bildern II und III dargestellt.

Tabelle I: Werte

$C_1$	8,153	nF
$C_2$	922,0	nF
$C_3$	18,99	nF
$L_2$	837,0	mH
$R_4$	10,00	k $\Omega$

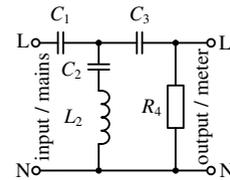


Bild II: Ersatzschaltbild

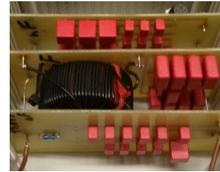


Bild III: Fertige Schaltung

Durch Bilineartransformation wurden die Parameter eines digitalen Filters ermittelt und durch anschließende Skalierung so optimiert, dass die Abweichung vom Übertragungsverhältnis 1 zwischen 2050 Hz und 150 kHz maximal  $\pm 0,3\%$  beträgt. Die Übertragungsfunktion und die zugehörigen Parameter des Filters sind in der Tabelle II angegeben.

Tabelle II: Übertragungsfunktion und Parameter des digitalen Filters

$$G_{HD}(z) = \frac{\sum_{n=0}^3 a_n \cdot z^{-n}}{\sum_{n=0}^3 b_n \cdot z^{-n}}$$

$n$	$a_n$	$b_n$
0	0,994216082226337	1
1	-2,982646958351872	-2,982397669792474
2	2,982646958351872	2,964943707069850
3	-0,994216082226337	-0,982545243716226

Sowohl das analoge als auch das digitale Filter haben sich für den praktischen Einsatz als geeignet gezeigt, jeweils mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen, welche ausführlicher in [3] diskutiert werden. Das analoge Filter wird bereits an einer weiteren Hochschule und bei einem Netzbetreiber eingesetzt und hat sich darüber hinaus auch für die Messung von Teilentladungen bewährt.

- [1] IEC 61000-4-7 Ed. 2.1, *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto*, IEC 61000-4-7:2002+A1:2008
- [2] IEC 61000-4-30 Ed. 3, *IEC 61000-4-30: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods*, FDIS:2014-11
- [3] M. Klatt, R. Wolf, J. Meyer, B. Wittenberg, P. Schegner: *Filter for the Measurement of Supraharmonics in Public Low Voltage Networks*, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe, Dresden, 2015



Jan Meyer, Dr.-Ing.

## NEQUAL – Erfassung der Spannungsqualität nach EN 50160 in der Schweiz

Um die Einhaltung der Produktnorm für Elektrizität EN 50160 an einem bestimmten Punkt im Netz zu überprüfen, führt der Netzbetreiber eine einwöchige Messung vorgegebener Kenngrößen der Spannungsqualität durch. Da verschiedene Elektrizitätsunternehmen Messgeräte unterschiedlicher Hersteller einsetzen, unterscheiden sich sowohl das Datenformat als auch die erzeugten Auswertebereiche voneinander. Übersichtliche Darstellungen der Ergebnisse für mehrere Messorte und Wochen sind oftmals nur durch einen zeitaufwändigen Export der Messdaten und deren manuelle Zusammenführung in anderen Auswerteprogrammen möglich. Anonymisierte Vergleiche zwischen Elektrizitätsunternehmen sind gar nicht oder nur mit sehr hohem Zusatzaufwand möglich. Um diese Hürden weitestgehend zu überwinden und auch bei stetig wachsendem Datenaufkommen eine effiziente und einheitliche Auswertung der Spannungsqualität zu gewährleisten, wurde das internetbasierte Programmsystem NEQUAL in Kooperation zwischen verschiedenen Partnern entwickelt (Bild I). Neben den Messdaten werden auch zusätzliche Informationen zum Messort, wie Anlass der Messung, Kundenstruktur oder Kurzschlussleistung gespeichert.

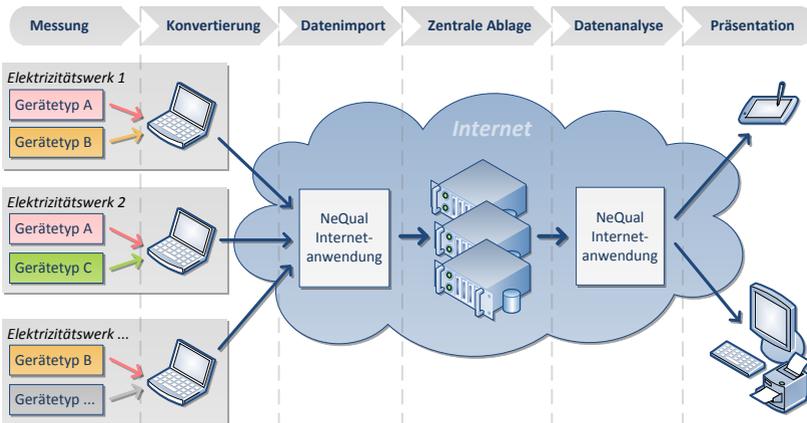


Bild I: Prinzipieller Aufbau und Funktionsweise des Programmsystems NEQUAL

Für die Übersichtsauswertung werden alle Messungen im Niederspannungsnetz, jedoch nicht die Beschwerdemessungen und die sonstigen Messungen

verwendet. Dies führt zu einem Datensatz von insgesamt 706 Messungen aus den Jahren 2008 bis 2014. 61 % der Messungen erfolgten in städtischen Gebieten, 38 % im ländlichen Raum und 1 % in Gebirgsregionen. 37 % der Messungen erfolgten in Wohngebieten.

Für jede Messung und jede Qualitätskenngröße wird das gemessene 95%-Quantil auf den vorgegebenen Wert nach EN 50160 bezogen. Bild II stellt jedes normierte 95%-Quantil als Punkt dar. Der Balken repräsentiert den gesamten Variationsbereich aller Messungen für die entsprechende Qualitätskenngröße.

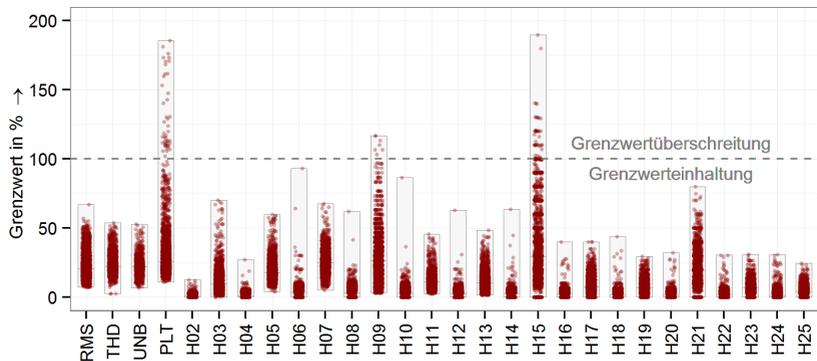


Bild II: Übersicht der Messergebnisse für die kontinuierlich zu erfassenden Qualitätskenngrößen

Neben Überschreitungen bei der Langzeit-Flickerstärke  $P_{It}$ , welche seit 2012 leicht rückläufig sind, treten Überschreitungen bei Spannungsharmonischen auf, deren Ordnung als Vorzugssystem das Nullsystem ausbildet. Die 15. Spannungsharmonische überschreitet den Grenzwert nach EN 50160 bspw. um bis zu 90 %, wobei praktisch alle Überschreitungen bei Messungen in Stadtgebieten auftraten. Ähnliches wurde auch bei Messungen in anderen Ländern (z. B. in Deutschland) festgestellt und ist u. a. auf den vergleichsweise niedrigen Grenzwert von 0,5 % zurückzuführen, der nur noch ungenügend dem Emissionsverhalten der Technologien heutiger elektronischer Massengeräte (z. B. Energiesparlampen) Rechnung trägt.

[1] J. Meyer, E. Gasch, H. Holenstein: *Transparenz im Datenschwungel - Vergleich und Auswertung von Spannungs-Qualitätsmessungen nach EN 50160*, VSE/electrosuisse Bulletin 12/2014.

[2] J. Meyer, et.al.: *NeQual – Web-based Voltage Quality Monitoring in Switzerland*, Paper 1407, 23rd International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Lyon, 15-18 June 2015.



Friedemann Möller, Dipl.-Ing.

#### Störbeeinflussungen bei der Ladung von Elektrofahrzeugen

In Folge der zunehmenden Anzahl an Elektrofahrzeugen werden auch vermehrt Fälle von Störungen mit ungewolltem Abbruch der Ladung bekannt. Am Lehrstuhl wurden verschiedene Fälle ungewollter Ladeabbrüche genauer analysiert. Die ungewollten Ladeabbrüche waren dabei auf zwei Ursachen zurückzuführen:

- Höherfrequente Spannungsanteile (Supraharmonische) mit Frequenzen zwischen 10 und 20 kHz
- Spannungsharmonische die vorzugsweise Nullsysteme ausbilden

Der Ladeabbruch durch Supraharmonische tritt dann auf, wenn in der Netzspannung bereits ein höherfrequenter Anteil existiert, dessen Frequenz in der Nähe der Schaltfrequenz des Elektrofahrzeug-Ladegleichrichters liegt und eine ausreichend hohe Amplitude  $\hat{U}_{HF} > 1 \text{ V}$  aufweist. Der Abbruch erfolgt nahezu zeitgleich mit dem Auftreten des höherfrequenten Signalanteils. Abhilfe kann z. B. durch eine Verlängerung des Kabels zwischen Elektrofahrzeug und Störquelle (im untersuchten Fall ein Elektrofahrzeug anderen Typs an der gleichen Ladesäule) erfolgen, da das höherfrequente Signal dadurch hinreichend gedämpft wurde.

Der Ladeabbruch durch Spannungsharmonische trat bislang nur bei dreiphasig ladenden Elektrofahrzeugen eines Fahrzeugtyps auf. Dabei spielt die eingestellte Ladestromstärke keine Rolle. Das Elektrofahrzeug lädt ca. zwei Minuten und unterbricht die Ladung anschließend für eine Minute um erneut zwei Minuten zu laden. Nach der dritten Unterbrechung dieser Art wird die Ladung endgültig mit einer Fehlermeldung abgebrochen. Bild I zeigt beispielhaft einen gemessenen Ladeabbruch dieser Art. Um die Störung genauer zu untersuchen, wurden umfangreiche Messungen am Teststand des Lehrstuhls durchgeführt. Durch Variation des Betrags und der Winkel einzelner Spannungsharmonischer ergab sich, dass ein Ladeabbruch immer dann auftritt, wenn die Nullsystemanteile einzelner oder mehrerer Spannungsharmonischer einen zu hohen Betrag aufweisen. Durch unsymmetrische Veränderung der Phasenwinkel der Spannungsharmonischen in den einzelnen Phasen konnten auch Harmonische, deren Vorzugssystem das Mit- oder Gegensystem ist, in das Nullsystem überführt werden.

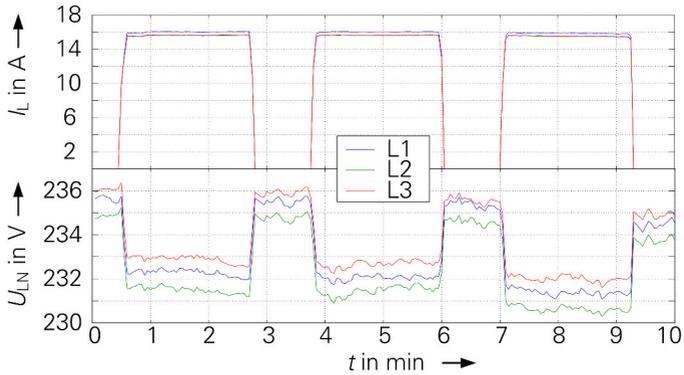


Bild I: Ladestrom- und Spannungsverlauf bei Beeinträchtigung der Ladung durch Spannungsharmonische

Bild II stellt die Ergebnisse dar. Es ist zu erkennen, dass der Betrag der Spannung, bei der ein Abbruch auftritt, nahezu proportional mit  $1/f$  abnimmt. Wie an der 3. Harmonischen deutlich zu erkennen ist, kann eine Winkeländerung dazu führen, dass bereits bei kleineren Spannungsbeträgen ein Ladeabbruch verursacht wird. Bei Kombination mehrerer nullsystembildender Spannungsharmonischer wird der zum Abbruch führende Spannungsbetrag der einzelnen Harmonischen verringert.

Die Ladeabbrüche traten auch auf, obwohl alle Grenzwerte nach DIN EN 50160 eingehalten waren. Diese Art der Ladeunterbrechung konnte durch einphasige Ladung unterbunden werden. Im Hinblick auf erhebliche längere Ladezeiten, Spannungsunsymmetrie sowie Ausnutzung der Betriebsmittel im Netz ist die einphasige Ladung jedoch zu vermeiden.

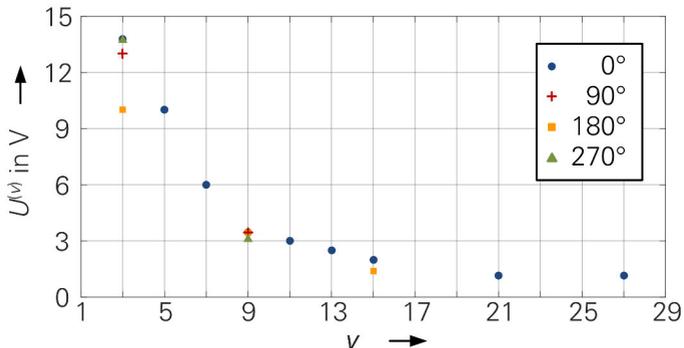


Bild II: Betrag der Spannungsharmonischen im Nullsystem bei dem es zu Ladeunterbrechungen kam



Sascha Müller, Dipl.-Ing.

### Analyse der Oberschwingungsemission in einem Netz mit dezentraler Ladeinfrastruktur

Aufgrund der politischen Rahmenbedingungen wird für die nächsten Jahre eine signifikante Zunahme der Zahl der Elektrofahrzeuge (EV) prognostiziert. Die meisten dieser Fahrzeuge besitzen ein eigenes Ladegerät, welches mittels einer leistungselektronischen Schaltung die Netzspannung in eine Gleichspannung umwandelt. Bei diesem Prozess entstehen durch das Schalten der Leistungshalbleiter Harmonische im Netzstrom, die ihrerseits über die Netzimpedanz zu einer Verzerrung der Spannung führen können. Es ist daher notwendig, die Auswirkungen einer zunehmenden Durchdringung von Elektrofahrzeugen auf die Oberschwingungssituation zu simulieren. Voraussetzung dafür sind ausreichend genaue Modelle, die auch im Zusammenwirken mit anderen Verbrauchern und Erzeugern im Netz zuverlässige Ergebnisse liefern. Diese werden im Rahmen von umfangreichen messtechnischen Untersuchungen im Labor entwickelt. Um deren Genauigkeit in realen Netzsimulationen zu verifizieren, wurde eine Feldmessung in einem städtischen Niederspannungsnetz mit dezentraler Ladeinfrastruktur durchgeführt [1].

Innerhalb dieses Netzes wurde ein Strang ausgewählt, der über einen Kabelverteiler zehn Haushalte sowie die Straßenbeleuchtung versorgt. Während der Messung wurde jedem Haushalt ein einphasig mit maximal 16 A ladendes Elektrofahrzeug zugeordnet. Dabei wurden vier unterschiedliche Fahrzeugtypen berücksichtigt. Um die Überlagerung der Oberschwingungsströme dieser Fahrzeuge zu untersuchen, wurde an einem Tag eine koordinierte Ladung durchgeführt, bei der alle Fahrzeuge der gleichen Phase zugeordnet und schrittweise eingeschaltet wurden. Die eingesetzten Messgeräte haben jeweils die Spannungs- und Stromharmonischen der Einzelfahrzeuge, sowie die Überlagerung aller Fahrzeuge und der Haushalte am Kabelverteiler gemessen. Zum Vergleich fand eine Referenzmessung statt, bei welcher die Oberschwingungsemission der Haushalte ohne Fahrzeuge erfasst wurde.

In Bild 1a ist die 3. Stromharmonische für die einzelnen Fahrzeuge dargestellt. Zur besseren Einordnung ist außerdem noch ein Bereich für den Phasenwinkel markiert, in welchem sich typischerweise die 3. Stromharmonische in Netzen mit Haushaltskunden befindet. Zu erkennen ist, dass bis auf ein Fahrzeug die Stromharmonischen alle nahezu die gleiche Winkellage aufweisen. Diese ist zudem mit der in Netzen mit Haushaltskunden identisch, so dass eine fast arithmetische Überlagerung der Einzelströme zu erwarten ist. Das Teilbild 1b zeigt ausgehend von der Stromemission ohne Elektrofahrzeuge (blau) den Vorgang des schrittweisen Zuschaltens der Fahrzeuge (rot). Es ist eine eindeutige Dominanz der Elektrofahrzeuge gegenüber den Haushalten zu erkennen. Den Einfluss auf die Spannung verdeutlicht das Teilbild 1c. Über

den Zeitraum des schrittweisen Zu- und Abschaltens ist eine positive Differenz der 3. Spannungsharmonischen zwischen dem Hausanschluss am Ende des Strangs und dem Kabelverteiler (blau) zu erkennen, welche einem Anstieg der 3. Spannungsharmonischen durch die Elektrofahrzeuge entspricht. Zu sehen ist, dass es eine direkte Korrelation zum Verlauf der 3. Stromharmonischen am Verteiler gibt (rot).

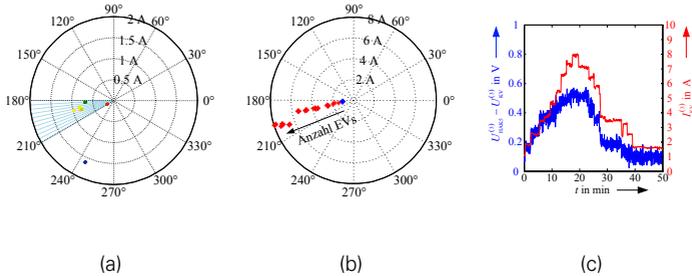


Bild I: 3. Stromharmonische der EVs und ihr Einfluss auf die Spannung

Eine ähnliche Darstellung für die 5. Harmonische ist in Bild II dargestellt. Während die Elektrofahrzeuge auch in diesem Fall nahezu die gleiche Winkellage besitzen, gibt es eine Differenz von ca.  $90^\circ$  bis  $120^\circ$  zwischen ihrem Winkel und dem dominierenden Winkelbereich in Netzen mit Haushaltskunden. Daraus folgt, dass sich aufgrund der Fahrzeuge auch der Phasenwinkel der 5. Stromharmonischen am Kabelverteiler ändert, wie in Teilbild IIb zu sehen ist. Hinsichtlich der Spannung führt dies zu einer leichten Absenkung des im Netz bereits vorhandenen Pegels. Im Vergleich zur 3. Harmonischen haben die Elektrofahrzeuge einen positiven Einfluss (kompensierende Wirkung). Dieser Effekt wird sich jedoch mit zunehmender Dominanz der Elektrofahrzeuge vermindern und ab einem bestimmten Durchdringungsgrad in das Gegenteil umschlagen.

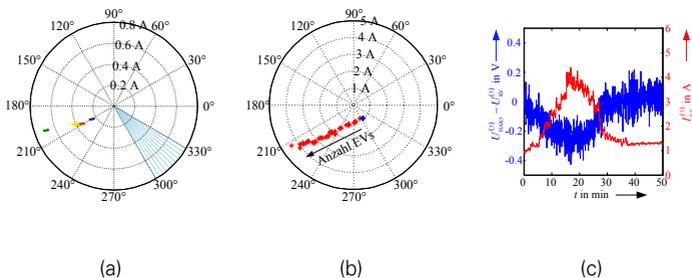


Bild II: 5. Stromharmonische der EVs und ihr Einfluss auf die Spannung

- [1] F. Möller, S. Müller, J. Meyer, P. Schegner, *Impact of Electric Vehicle Charging on Unbalance and Harmonic Distortion - Field Study in an Urban Residential Area*. CIREN, Lyon, 2015.



Robert Stiegler, Dipl.-Ing.

## Messung der frequenzabhängigen Netzimpedanz in Niederspannungsnetzen mit hohem Anteil leistungselektronischer Geräte

Die große Zahl leistungselektronischer Geräte führt im Niederspannungsnetz zu Oberschwingungsströmen, welche aufgrund der frequenzabhängigen Netzimpedanz zu Oberschwingungsspannungen führen. Diese wiederum können andere Geräte unzulässig beeinflussen. Um Grenzwerte für Oberschwingungsströme, insbesondere für große Anlagen, zuverlässig festlegen zu können, aber auch um die Ursachen für hohe Oberschwingungspegel zu analysieren, ist eine genaue Kenntnis der frequenzabhängigen Netzimpedanz unerlässlich.

Die frequenzabhängige Netzimpedanz ist nur für passive Elemente (z. B. Leitungen und Transformatoren) definiert. Im Falle elektronischer Geräte mit geschalteten Elementen kann sich die frequenzabhängige Netzimpedanz innerhalb einer Spannungshalbwelle jedoch deutlich ändern. Dies gilt insbesondere für einfache Gleichrichterschaltungen, deren Zwischenkreiskondensator während der kurzen Nachladezeit von wenigen Millisekunden je Halbwelle der Netzspannung mit dem Netz verbunden ist. In der restlichen Zeit verhält sich die Schaltung eingangsseitig hochohmig. Das vorgestellte Projekt hat das Ziel, den Einfluss elektronischer Eingangsschaltungen auf die Bestimmung der frequenzabhängigen Netzimpedanz systematisch zu untersuchen.

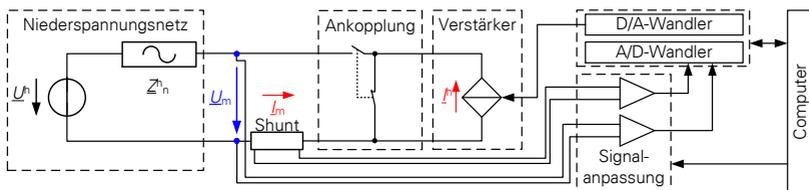


Bild I: Aufbau des Messsystems

Es wurde am IEEH ein Messsystem entwickelt, mit dem die frequenzabhängige Netzimpedanz innerhalb der Spannungshalbwelle erfasst werden kann. Das Messsystem ist in Bild I dargestellt. Mit einem D/A-Wandler werden die Signale erzeugt, welche mit einem Linearverstärker als Stromquelle in das Niederspannungsnetz eingepreßt werden. Der eingepreßte Strom sowie die sich dabei einstellende Spannung werden über Signalanpassungsmodule mit einem A/D-Wandler erfasst und anschließend mit dem Mess- und Steuercomputer ausgewertet. Mit dem Verstärker können Ströme mit Beträgen von bis zu 10 A und Frequenzen von bis zu 150 kHz ausgegeben werden. Die Verläufe werden mit 800 kS/s erfasst. Die Messung wird im Single-Sweep-Verfahren durchgeführt, um die Beeinflussung des Netzes gering zu halten. Für jeden

Frequenzschritt werden jeweils 10 Perioden der Spannungsgrundschwingung ohne und mit eingepprägtem Strom gemessen. Aus der Differenz beider Messungen wird die Netzimpedanz für die jeweilige Frequenz berechnet. Besonderer Bedeutung kommt hierbei der Wahl des Fensters für die angewendete diskrete Fouriertransformation (DFT) zu.

Bei der klassischen Messung der frequenzabhängigen Netzimpedanz wird die DFT über volle Perioden der Spannungsgrundschwingung (VC – Voltage Cycle based) durchgeführt. Zusätzlich wird die DFT über die Perioden des eingepprägten Stromes durchgeführt (CC – Current Cycle based). Letzteres ermöglicht die Bestimmung der frequenzabhängigen Netzimpedanz über kurze Abschnitte innerhalb der Spannungsgrundschwingung.

In Bild II sind Ergebnisse einer ersten, einphasigen Testmessung dargestellt. Diese Messung wurde in einer Unterverteilung im Institutsgebäude durchgeführt. An der gemessenen Phase ist u. a. die Flurbeleuchtung, bestehen aus 24 Kompaktleuchtstofflampen, angeschlossen. In Bild IIa ist die Netzimpedanz über der Frequenz und dem Winkel der Spannungsgrundschwingung dargestellt. Im Spannungsmaximum bzw. –minimum ( $90^\circ$  bzw.  $270^\circ$ ), wenn die Zwischenkreiskondensatoren der angeschlossenen leistungselektronischen Geräte nachgeladen werden, unterscheidet sich die Impedanz deutlich von den restlichen Bereichen. Im Bild IIb ist der Vergleich der VC-Methode und der CC-Methode bei  $0^\circ$  und  $97^\circ$  dargestellt. Hier wird deutlich, dass sich die Impedanz bei  $0^\circ$  und  $97^\circ$  um bis zu Faktor 2 voneinander unterscheiden. Mit der „klassischen“ VC-Methode wird eine mittlere Impedanz bestimmt, die Veränderung der Netzimpedanz innerhalb der Spannungsgrundschwingung jedoch nicht erfasst. Dies zeigt, dass weiterer Diskussionsbedarf hinsichtlich der Interpretation der frequenzabhängigen Netzimpedanz in Netzen mit hohem Anteil leistungselektronischer Geräte besteht.

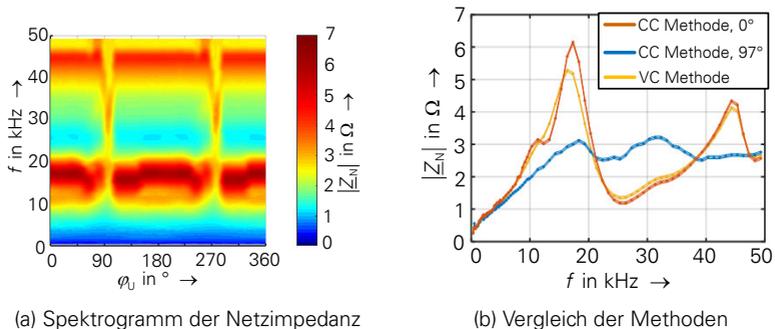


Bild II: Messergebnisse der Testmessung

- [1] Stiegler, R.; Chakravorty, D.; Meyer, J.; Schegner, P.: *Measurement of network harmonic impedance in presence of electronic equipment. IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS) 2015, Aachen, Germany, 23.-25.9.2015*



Stefan Ungethüm, Dipl.-Ing.

## Messung des frequenzabhängigen Übertragungsverhaltens eines Ortsnetztransformators

Moderne leistungselektronische Geräte wie Ladegleichrichter von Elektrofahrzeugen arbeiten mit Schaltfrequenzen im Bereich zwischen 2 und 150 kHz. Bisher ist wenig darüber bekannt, wie sich diese *Supraharmonischen* im Netz ausbreiten. Für entsprechende Untersuchungen kommt dem MS/NS-Transformator eine besondere Bedeutung zu, da dieser verschiedene Netzebenen miteinander verbindet. Eine stark gedämpfte Übertragung entlang des Transformators würde den zu betrachtenden Bereich bei Ausbreitungsuntersuchungen begrenzen.

Um hierzu eine Einschätzung zu erhalten, wurde das frequenzabhängige Übertragungsverhalten eines Ortsnetztransformators (Schaltgruppe Dyn5,  $S_{TF} = 100 \text{ kVA}$  und  $U_{fOS}/U_{fUS} = 20 \text{ kV}/400 \text{ V}$ ) im Frequenzbereich von 2 bis 80 kHz messtechnisch untersucht. Nacheinander wurde auf beiden Seiten des Transformators ein Testsignal (bestehend aus einer 50 Hz-Grundschiwingung und einem überlagerten, diskreten, höherfrequenten Sweep) eingepreßt und auf der jeweils anderen Seite das resultierende Signal gemessen. Durch Division von Ausgangs- und Eingangssignal bei einer Frequenz und unter Berücksichtigung des Bemessungsübersetzungsverhältnisses wurde das frequenzabhängige Übersetzungsverhältnis  $n_{f,Li}$  (zwischen gleichen Phasen) bzw. das Kopplungsverhältnis  $k_{f,Li/Lj}$  (zwischen verschiedenen Phasen) bestimmt. Insgesamt wurden drei Messreihen durchgeführt:

- (1) Einspeisung auf der US\*-Seite mit  $U_{50\text{Hz}} = 230 \text{ V}$  und  $U_{\text{HF}} = 5,6 \text{ V}$
- (2) Einspeisung auf der OS\*-Seite mit  $U_{50\text{Hz}} = 230 \text{ V}$  und  $U_{\text{HF}} = 5,6 \text{ V}$
- (3) Einspeisung auf der US-Seite mit  $U_{50\text{Hz}} = 4,6 \text{ V}$  und  $U_{\text{HF}} = 0,2 \text{ V}$

Die zusätzliche Grundschiwingung bei Messreihe (1) soll eine realitätsnahe Kernmagnetisierung erreichen. Aufgrund der Begrenzung des eingesetzten Messaufbaus konnte für die Messreihe (2) keine Grundschiwingung mit einer Spannung von  $20 \text{ kV}/\sqrt{3}$  erzeugt werden. Um zumindest eine gewisse Kernmagnetisierung zu erreichen, wurden ebenfalls 230 V bei 50 Hz verwendet. Die Messreihe (3) repräsentiert eine mit Messreihe (2) vergleichbare Magnetisierung bei Einspeisung auf der US-Seite. Für jede Messreihe wurden mehrere Teilmessungen durchgeführt. Das höherfrequente Signal wurde nacheinander einphasig in alle drei Phasen eingespeist und die Amplitude des Testsignals sowie der Grundschiwingung wurden nacheinander um  $\pm 10 \%$  verändert.

\*US: Unterspannungsseite, OS: Oberspannungsseite

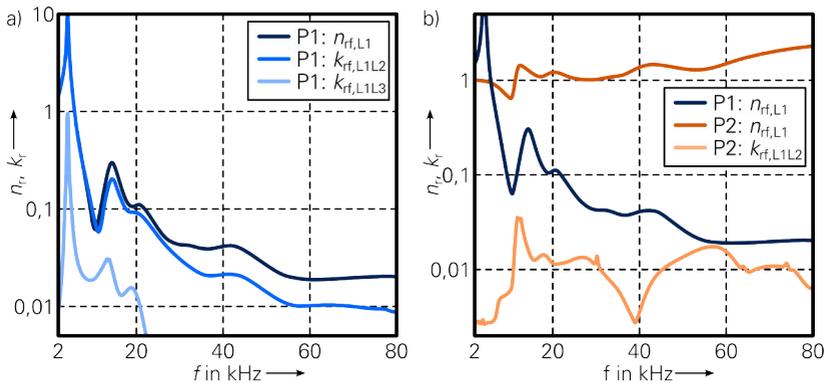


Bild I: Vergleich der einzelnen Phasen (US nach OS)

Ausgewählte Ergebnisse der Untersuchung sind in Bild I dargestellt. Teilbild a) zeigt das Übersetzungs- bzw. Kopplungsverhältnis eines auf der US-Seite in L1 eingepprägten höherfrequenten Signals der drei Phasen auf der OS-Seite. Durch die magnetische Verschaltung (Dy-Schaltgruppe) wirkt sich die US-seitige Anregung in einem Leiter auf zwei Leiter auf der OS-Seite aus. Während ein höherfrequentes Signal bei Übertragung von US-Seite nach OS-Seite bis ca. 4 kHz nicht gedämpft, teilweise sogar verstärkt wird, nimmt oberhalb von 4 kHz die Dämpfung deutlich zu und überschreitet ab 20 kHz den Faktor 10.

Wie Teilbild b) zeigt, hängt das höherfrequente Übertragungsverhalten des Trafos stark davon ab, auf welcher Seite die Supraharmonischen eingepragt werden. Bei Einspeisung auf der OS-Seite werden die Supraharmonischen nahezu unverändert (unter Beachtung des Bemessungsübersetzungsverhältnisses) auf die US-Seite übertragen. Eine leichte Verstärkung der Signale mit zunehmender Frequenz lässt sich nicht ausschließen.

Der Einfluss der Variation des Testsignals um  $\pm 10\%$  (sowohl für die Grundschwingung als auch die höherfrequente Komponente) auf das Übertragungsverhalten ist vernachlässigbar. Aber eine im Verhältnis zur Bemessungsspannung sehr kleine Grundschwingung (Messreihe (1) vs. Messreihe (3)) hat erhebliche Auswirkungen auf die Magnetisierung des Kerns. Es wurde eine Abweichung zwischen den Testreihen (1) und (3) von etwa 75 % festgestellt.

Die Messungen an dem Ortsnetztransformator haben gezeigt, dass die Supraharmonischen, die in NS-Netzen entstehen, praktisch nicht ins vorgelagerte MS-Netz übertragen werden. Supraharmonische, die in MS-Netzen entstehen (z.B. durch Power-Line-Communication), sollten in allen angeschlossenen NS-Netzen berücksichtigt werden.

[1] S. Schöttke et. al. *Transfer characteristic of a MV/LV transformer in the frequency range between 2 kHz and 150 kHz*. EMC 2015, Dresden

[2] M. Klatt et. al. *Frequency Responses of MV voltage transformers in the range of 50 Hz to 10 kHz*. ICHQP 2010, Bergamo



Olga Zybalkina, M.Sc.

### Methods for Trend Identification in Power Quality Parameters

The integration of new device technologies on a large scale, like the transition from incandescent to LED lamps or the increasing penetration of photovoltaic (PV) installations, may result in long-term changes in the level of power quality (PQ) parameters, like current harmonic or voltage unbalance. The identification and quantification of long-term trends can support network operators to detect slow, but maybe fundamental changes in PQ levels and to assist the asset management in order to manage PQ levels at optimized costs. Therefore the presented project studies the development and application of automatic methods for trend detection.

The proposed methodology includes three main steps: (1) pre-processing of the time series, (2) assessment of „global“ trends and (3) assessment of „local“ trend [1]. The input data for each considered PQ parameter consists of the weekly calculated 95<sup>th</sup> percentiles of the 10-min-mean values, which masks the always existing short-term variations like daily and weekly cycles. The pre-processing is based on the additive component model for time series decomposition and includes the separation of a trend component, a seasonal component and a residual component. In order to extract a smoothed trend component and remove seasonal and residual components, the STL method (seasonal and trend decomposition using locally-weighted regression) is applied. It should be noted that for the application of the method a time series has to consist of at least two periods of the expected seasonal component which is two years in this application.

The global trend is quantified by the index  $g$ , which represents the annual gain. In order to calculate  $g$ , a linear function is fitted to the smoothed trend component of the whole measurement interval. The gain value is calculated as ratio of the annual estimated slope to the estimated intercept. Based on author's experience a significant trend exists for gain values  $|g| > 5\%$  per year. The sign determines the direction of trend, either increasing or decreasing.

The global trend, for example in Fig. 1a increases by  $g = +10\%$  and in Fig. 1b by about  $+21\%$  per year. However, the last 80% weeks of the measurement interval show already a continuous decrease of the smoothed trend component, which is completely masked by the global trend analysis.

In order to obtain more recent trend information at shorter update intervals and to avoid misinterpretation of the „global“ trend, the „local“ trend is introduced. The quantification of the local trend is based on a half-year segmentation of the measurement interval, but might also be updated on a weekly base, i.e. more frequent than twice a year. Similar to the global trend identification the gain  $g$  is calculated, but for each segment. A simple, but

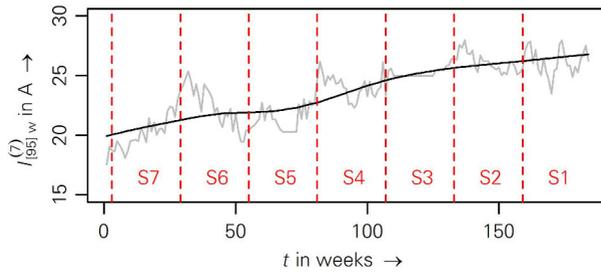
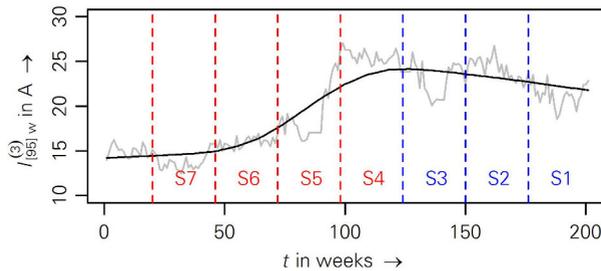
(a) 7<sup>th</sup> harmonic current over 184 weeks; office area; phase L1(b) 3<sup>rd</sup> harmonic current over 201 weeks; residential area; phase L1

Figure 1: 5<sup>th</sup> percentiles of the 10-min-mean values; time series (gray), smoothed trend component (black); half year segments are marked, color indicates local trend (red: increasing; blue: decreasing)

efficient index to quantify the level of local trend variation is the range of the half-year gains within the observation interval. A low value (between 5 % and 20 %) indicates a consistent trend (Fig. 1a), while attention should be paid to gain variations higher than 20 %. For the example in Fig. 1a only the local trend reveals that the last three segments S1 to S3 show a slight decrease as it is clearly identified by the range of gains of 31 %. Based on the consistency of the trend (e.g. of the recent four segments) a risk index can be derived for the network operator.

Long-term measurements of at least 2 and up to 4 years have been studied for 8 sites with different consumer configuration: residential areas with multi- or single- family houses, shopping centers and office buildings. Increasing global trends were detected for about 15 % of the considered PQ parameters, decreasing global trends for about 13 % of time series. The local trend analysis reveals that about 20 % of the time series have gain variations within the half year segments of more than 20 %.

[1] M. Domagk, O. Zybikina, J. Meyer, and P. Schegner, *Trend Identification in Power Quality Measurements*, 25th Australasian Universities Power Engineering Conference, Wollongong, Aust. 2015.

## Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Schutz- und Leittechnik“



Jörg Meyer, Dr.-Ing.

Zuschaltung langer kompensierter Kabelstrecken

Die Anbindung von Offshore Windparks erfolgt durch lange Seekabelstrecken. Zur Kompensation des kapazitiven Ladestromes dieser langen Kabelstrecken sind Kompensationsspulen an den Enden der Kabelverbindung installiert.

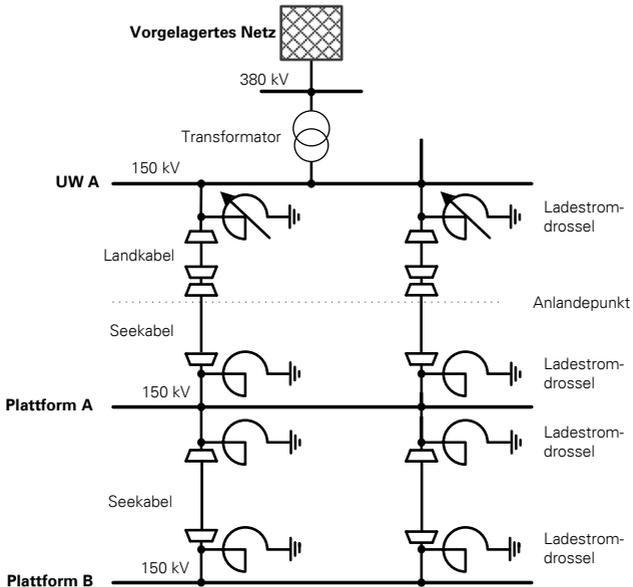


Bild I: Struktur des Netzanschlusses

Diese Anordnung kann für die untersuchte Zuschaltung einer kompensierten Kabelstrecke wie folgt elektrisch modelliert werden (Bild I). Die Kabelstrecke wurde dabei als 3-phasiges induktiv verkettetes Element modelliert (Bild II). Eine kapazitive Verkettung besteht auf Grund der geschirmten 1-Leiteranordnung nicht.

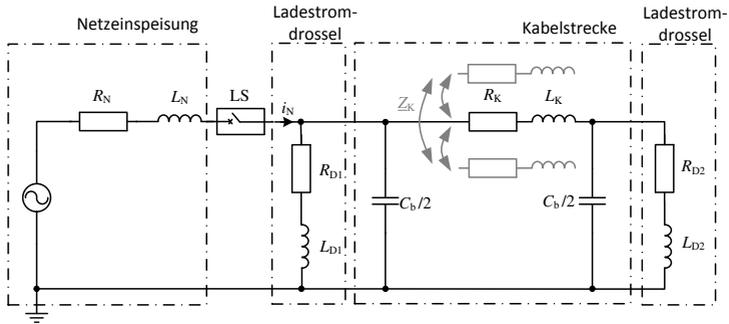


Bild II: Elektrisches Ersatzschaltbild

Dafür kann folgendes Gleichungssystem angegeben werden. Für die numerische Lösung dieses Gleichungssystems wurde die Zustandsraumdarstellung gewählt.

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \mathbf{i}_N \\ \mathbf{i}_{D1} \\ \mathbf{i}_\lambda \\ \mathbf{i}_{D2} \\ \mathbf{u}_{C1} \\ \mathbf{u}_{C2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R_N}{L_N} \mathbf{E} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\frac{1}{L_N} \mathbf{E} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\frac{R_{D1}}{L_{D1}} \mathbf{E} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\frac{1}{L_{D1}} \mathbf{E} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & -L_K^{-1} R_K & \mathbf{0} & L_K^{-1} & -L_K^{-1} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\frac{R_{D2}}{L_{D2}} \mathbf{E} & \mathbf{0} & \frac{1}{L_{D2}} \mathbf{E} \\ \frac{1}{C_1} \mathbf{E} & -\frac{1}{C_1} \mathbf{E} & -\frac{1}{C_1} \mathbf{E} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \frac{1}{C_2} \mathbf{E} & -\frac{1}{C_2} \mathbf{E} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{i}_N \\ \mathbf{i}_{D1} \\ \mathbf{i}_\lambda \\ \mathbf{i}_{D2} \\ \mathbf{u}_{C1} \\ \mathbf{u}_{C2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L_N} \mathbf{u}(t) \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}$$

Damit ergeben sich folgende Zeitverläufe beim Zuschalten für  $\Psi = 0^\circ$  der kompensierten Kabelstrecke:

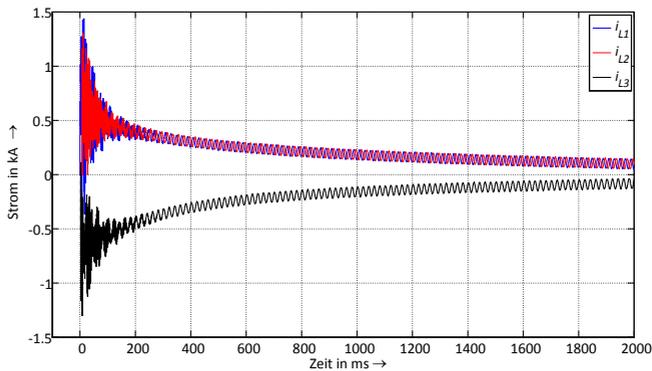


Bild III: Stromzeitverlauf beim Zuschalten der kompensierten Kabelstrecke

In Bild III sind die sehr lange ausbleibenden Stromnulldurchgänge zu erkennen. Im Rahmen einer Parameterstudie wird dieses Verhalten für verschiedene Einschalt- und Fehlerszenarien untersucht.



Sebastian Palm, Dipl.-Ing.

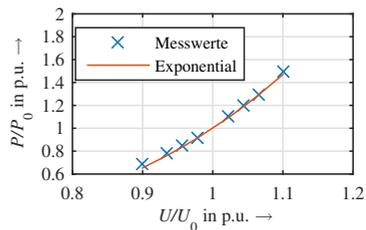
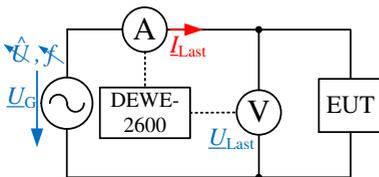
### Spannungs- und frequenzabhängige Lastmodellierung

Wirk- und Blindleistungsbedarf zahlreicher elektrischer Lasten weisen eine Abhängigkeit von der anliegenden Spannung und Frequenz auf. In einem stark ausgelasteten Netz sinkt die Verbraucherspannung aufgrund des Spannungsabfalls über den Leitungen ab, wodurch der Leistungsbedarf ohmscher Verbraucher abnimmt. Dadurch wird der Spannungsabfall über der Leitung reduziert. Bei einem Leistungsüberschuss im Verbundnetz steigt die Systemfrequenz an, wodurch sich der Leistungsbedarf direkt gekoppelter motorischer Lasten erhöht. Dadurch werden Leistungsüberschuss und erhöhte Frequenz teilweise kompensiert.

Um diese auch als Selbstregelleffekt der Lasten bezeichneten Zusammenhänge beschreiben zu können, wurden verschiedene Lastmodelle entworfen, um das stationäre und transiente Verhalten analytisch darzustellen [1,2]. In der Vergangenheit wurden die Parameter dieser Lastmodelle für zahlreiche Geräte bestimmt. Dabei wurde jedoch zumeist nur die statische Spannungsabhängigkeit untersucht und die Frequenz als konstant angenommen [3].

Mit dem Versuchsaufbau in Bild 1a wurden Spannungs- und Frequenzsprünge durchgeführt, um das Verhalten verschiedener Geräte auswerten zu können. Im Gegensatz zu vielen anderen Studien wurden auch die Frequenzabhängigkeit sowie das dynamische Verhalten verschiedener Verbraucher untersucht. Die Modellierung des statischen Verhaltens ist beispielhaft in Bild 1b dargestellt. Es wurde das Exponentialmodell nach (1) verwendet.

$$P_{\text{exp}} = P_0 \left( \frac{U}{U_0} \right)^{k_{pu}} \quad (1)$$



(a) Messschaltung für die Untersuchung einzelner Geräte

(b) Vergleich Polynomial- und Exponentialmode bei einem Motor

Bild 1: Messung und statische Modellierung

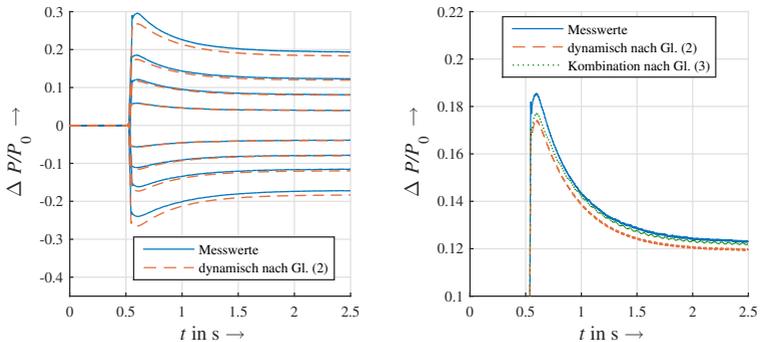
Die Modellierung des transienten Verhaltens wurde zunächst mit der Übertragungsfunktion in (2) durchgeführt. In Bild IIa ist zu erkennen, dass bei verschiedenen Spannungssprüngen mit dieser Variante eine gute Näherung erzielt wird. Aufgrund des symmetrischen Verhaltens der Übertragungsfunktion bei positiven und negativen Änderungen der Spannung wird jedoch insbesondere der stationäre Endwert nicht exakt nachgebildet.

Ein neuer Ansatz ist die Kombination eines statischen Lastmodells mit einem abklingenden, dynamischen Anteil wie in (3) dargestellt. Dadurch kann die stationäre Leistungsabweichung besser wiedergegeben werden und auch in der Modellierung des transienten Bereichs wird eine höhere Genauigkeit erreicht. Der Unterschied zwischen rein dynamischen und kombinierten Modell für  $\Delta U = 15\text{V}$  ist in Bild IIb dargestellt.

$$\frac{P_{\text{dyn}}}{P_0} = 1 + K_{pu} \cdot \frac{1 + s \cdot T_{pu1}}{1 + s \cdot T_{pu2}} \cdot \frac{\Delta U}{U_0} \quad (2)$$

$$\frac{P_{\text{komb}}}{P_0} = \left(\frac{U}{U_0}\right)^{k_{pu}} + \frac{s \cdot T_{pu1}}{1 + s \cdot T_{pu2}} \cdot \frac{\Delta U}{U_0} \quad (3)$$

Es ist somit möglich, das Verhalten einzelner Verbraucher sehr genau mit verschiedenen Lastmodellen abzubilden. Für Betrachtungen in größeren Netzen ist es jedoch nicht zweckmäßig, jedes elektrische Gerät einzeln nachzubilden. Auch die genaue Zusammensetzung der elektrischen Lasten im Netz ist weitestgehend unbekannt. In zukünftigen Untersuchungen wird das spannungs- und frequenzabhängige Verhalten ganzer Netzteile untersucht.



(a) Modellierung mit einer Übertragungsfunktion 1. Ordnung (b) Vergleich der dynamischen mit der kombinierten Modellierung

Bild II: Dynamische Modellierung eines Staubsaugers

- [1] W. Price, S. Casper et al. *Bibliography on load models for power flow and dynamic performance simulation*. IEEE Transactions on Power Systems, 1995.
- [2] EPRI *Technical Report - Measurement-Based Load Modeling*. Palo Alto 2006.
- [3] F. Puyleart, S. Yang *Load component database of household appliances and small office equipment*. IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2008.



Karsten Wenzlaff, M.Sc.

## Berechnungen von Schaltüberspannungen an einem Phasenschiebertransformator

Mit dem Einsatz von Phasenschiebertransformatoren (PST) kann der Lastfluss im Energieversorgungsnetz gesteuert werden. Für die Planung und Auslegung ist es erforderlich, im Rahmen der Isolationskoordination die maximal zu erwartenden inneren transienten Überspannungen - die Schaltüberspannungen - zu berechnen. Für die Untersuchung wird von einem Phasenschiebertransformator als Querregeltransformator ausgegangen, der sich unter Berücksichtigung der bekannten Quer- und Längselemente, wie in Bild I gezeigt, nachbilden lässt.

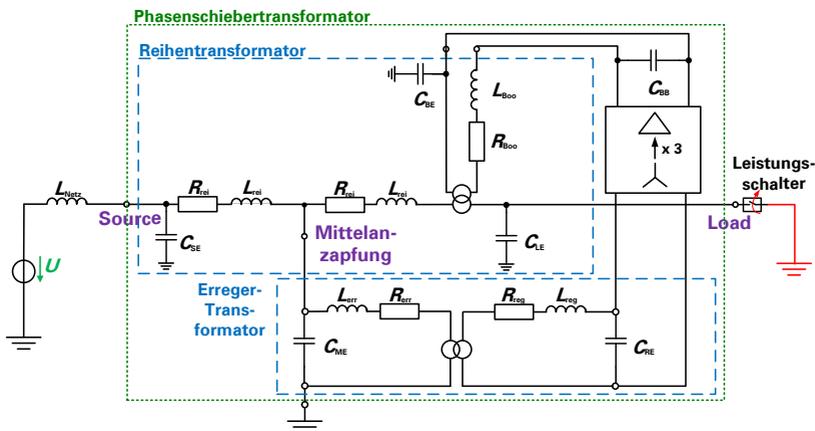


Bild I: Vollständiges Ersatzschaltbild mit den für eine Überspannungsberechnung relevanten Quer- und Längselementen des Phasenschiebertransformators (Querelemente des Magnetkreises sind nicht berücksichtigt)

Die Höhe der zu erwartenden Schaltüberspannung hängt im wesentlichen von dem eingesetzten Leistungsschalter ab, der einen Abschaltvorgang durchführt. Als signifikanter Parameter geht hierbei der jeweilige Abrissstrom ein, bei dessen Unterschreitung ein Leistungsschalter (bei anstehendem AUS-Schaltbefehl) den Stromfluss schlagartig unterbricht. Ist zum Schaltbefehlszeitpunkt der Abrissstrom noch nicht unterschritten, erfolgt keine Abschaltung. Die Größe des Abrissstromes ist dabei herstellerspezifisch.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden unterschiedliche Fehlerfälle angenommen und die damit verbundenen Schaltüberspannungen infolge einer Fehlerabschaltung durch den Leistungsschalter berechnet. Exemplarisch ist

dazu in Bild I die Abschaltung eines impedanzlosen Kurzschlusses direkt nach dem Phasenschieber dargestellt. In dem Fallbeispiel würde die in der Längsinduktivität gespeicherte Energie auf die Kapazität  $C_{LE}$  des PST überschwingen und dort ggf. zu Überspannungen führen. Die in der Induktivität gespeicherte Energie und somit die Höhe der resultierenden Überspannung ist dabei vom Abrissstrom des Leistungsschalters abhängig.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden die Überspannungen für 1- und 3-polige Fehler mit und ohne Automatischer Wiedereinschaltung (AWE) nach Fehlerklärung berechnet. Für den Fehlerort wurden die Berechnungen für drei Varianten durchgeführt:

- Kurzschluss am Leitungsanfang
- Kurzschluss auf einer Freileitung in 40 km Entfernung
- Kurzschluss auf einer Freileitung in 100 km Entfernung

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die Schalthandlungen am PST mit angeschalteter langer Freileitung und 3-poligem Fehler die höchsten Überspannungen zur Folge haben. Exemplarisch sind dazu die Ergebnisse in Bild II dargestellt.

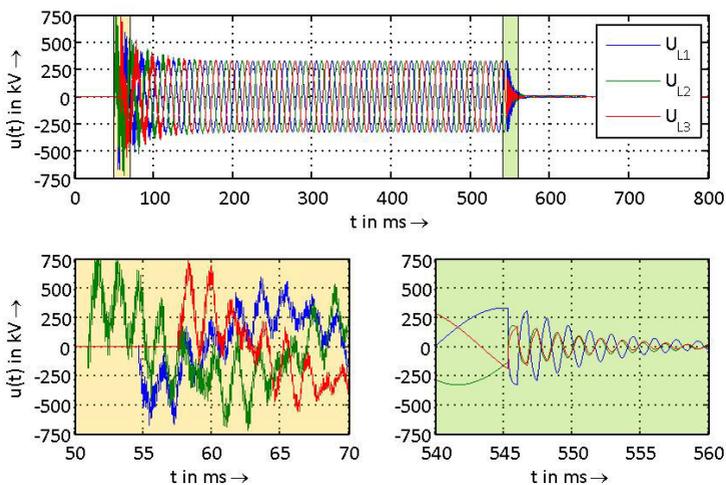


Bild II: Spannung über dem Leistungsschalter nach 3-poliger Kurzschlussabschaltung mit AWE (Abschaltkommando: 50 ms; Fehlerklärung: 300 ms; Wiedereinschaltung: 545 ms)

Bei der Abschaltung eines 3-poligen Fehlers am Ende einer langen Freileitung beträgt die Spannung über dem Schalter maximal das 2,69-fache der effektiven Nennspannung und ist somit nicht als kritisch für die Isolationsstrecke des Schalters einzuschätzen.

## Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Smart Grid“



Tobias Heß, Dipl.-Ing.

Smart-Grid Co-Simulationen mit Hilfe von Mosaik

Zur Modellierung und Simulation von Elektroenergiesystemen steht eine wachsende Anzahl von Berechnungsprogrammen zur Verfügung. Üblicherweise werden die Eingangsdaten für Simulationen von verschiedenen selbstentwickelten Berechnungsprogrammen zur Verfügung gestellt und müssen per Hand in das Datenformat des Berechnungsprogramms überführt werden. Diese manuelle Datenverarbeitung ist sehr zeitaufwändig und fehleranfällig. Co-Simulations-Umgebungen ermöglichen dagegen die Automatisierung der gesamten Simulation mit verschiedenen Berechnungsprogrammen. Die Vorteile einer Co-Simulations-Umgebung sind:

- einheitliche Definition des Simulationsszenarios unabhängig der verwendeten Simulationsprogramme
- austauschbare Quellen der Eingangsdaten
- austauschbare Netz-Berechnungsprogramme
- Integration von Netz-Regelstrategien unabhängig vom verwendeten Netz-Berechnungsprogramm
- einheitliches Format der Simulationsergebnisse

Mosaik [1] ist eine von der Universität Oldenburg und OFFIS entwickelte Co-Simulations-Umgebung. Das Hauptanwendungsgebiet dieser Umgebung sind Smart-Grid Simulationen mit einer Vielzahl unterschiedlicher Modelle (Lasten, Erzeugungsanlagen, Regler).

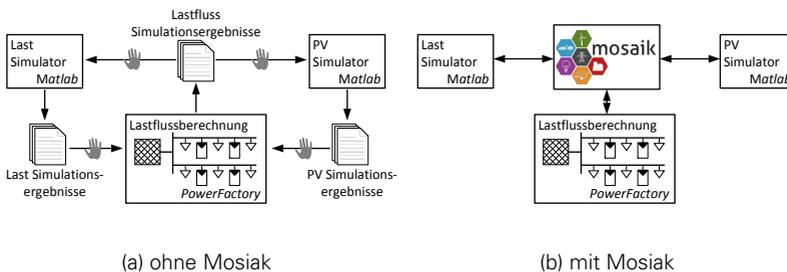


Bild I: Vergleich Simulationsumgebungen

Bild Ia zeigt die prinzipielle Simulationsrealisierung ohne Mosaik. PowerFactory modelliert das elektrische Netz mit allen Komponenten und benötigt z. B. die Eingangsdaten der Lasten und der PV-Anlagen. Diese Daten werden durch

die eigenentwickelten Berechnungsprogramme Last-Simulator bzw. PV-Simulator erstellt und werden per Hand in PowerFactory importiert. Wird durch den Last-Simulator z. B. ein Demand-Side-Management oder durch den PV-Simulator eine Blindleistungsregelung realisiert, hängen die Simulationsergebnisse vom Netzzustand ab. Damit wird eine iterative Berechnung in der Simulationsumgebung notwendig. Dies kann in der Regel nicht mehr von Hand realisiert werden.

Bild 1b zeigt die Struktur der Simulationsumgebung bei Anwendung von Mosaik. Durch eine einheitliche Schnittstelle wird die gesamte Simulation automatisch durch Mosaik verwaltet. Mosaik steuert in der Simulationsumgebung den Datenaustausch und die Berechnung für jeden Simulationsschritt. Die Kommunikation zwischen Mosaik und den Berechnungsprogrammen basiert dabei auf TCP-Verbindungen, über die JSON-kodierte Nachrichten ausgetauscht werden.

Im Rahmen des Projektes „Regionaler zellulärer Verbund von Versorgungseinheiten mit Netzregelaufgaben“\* wurde jeweils ein Interface zu Mosaik für die Berechnungsprogramme PowerFactory und Matlab entwickelt. Hierdurch können die Vorteile der Co-Simulation-Umgebung für umfangreiche Simulationen genutzt werden. Die Portabilität auf andere Programme ist dabei gewährleistet.

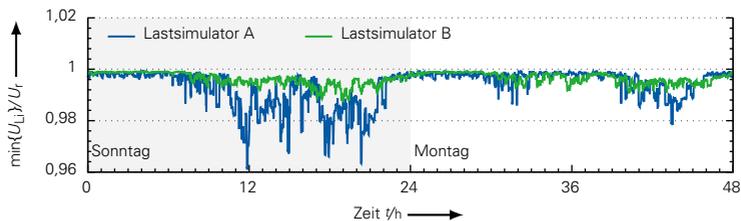
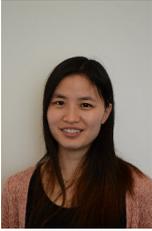


Bild II: Beispielsimulation mit zwei verschiedenen Lastsimulatoren

Bild II zeigt beispielhaft die Anwendung von Mosaik für vollautomatisierte Lastflussimulationen mit unsymmetrischer (Lastsimulator A) und symmetrischer Belastung (Lastsimulator B). Dabei verwendeten die beiden Lastsimulatoren unterschiedliche Ausgabeformate der Ergebnisse. Durch Mosaik konnten diese Formate automatisiert in die von PowerFactory benötigte Form übertragen werden. Dies reduziert insbesondere bei Szenariostudien den Simulationsaufwand erheblich. Mit dieser Anwendung von Mosaik konnte z. B. gezeigt werden, dass die unsymmetrische Modellierung der Last einen großen Einfluss auf berechneten Spannungen hat.

- [1] S. Schutte, S. Scherfke, M. Troschel, *Mosaik: A framework for modular simulation of active components in Smart Grids*. In: IEEE First International Workshop on Smart Grid Modeling and Simulation (SGMS), 2011

\*Projekt im Rahmen der Maßnahme „Support-the-Best“ gefördert aus den Mitteln der Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder.



Ma Liya, Dipl.-Ing.

#### Feldtest eines regionalen virtuellen Kraftwerks auf Basis der Mikro-KWK-Technologie

Die Anwendungen von Blockheizkraftwerken (BHKW) gewinnen wegen ihrer Kraftwärmekopplung (KWK) immer mehr an Bedeutung durch die effiziente Nutzung der erzeugten Energie. Zur Klasse der Mikro-KWK gehören Anlagen mit Bemessungsleistung bis zu 15 kW. Diese werden üblicherweise in Einfamilienhäusern eingesetzt. Das regionale virtuelle Kraftwerk (RVK) auf Basis der Mikro-KWK-Technologie betrachtet die Liegenschaften, die mit Mikro-BHKW und Wärmespeicher ausgestattet sind. Die Flexibilität der elektrischen Energieerzeugung, die der Wärmespeicher ermöglicht, wird im Strommarkt genutzt. Diese wärmegeführte, stromgesteuerte Betriebsweise des BHKWs sichert auf der einen Seite den Wärmebedarf des Hauses und erhöht bzw. optimiert auf der anderen Seite den Erlös aus dem Energiehandel.

Im Rahmen des aktuellen Forschungsvorhabens des Projektes „Praxiserprobung des Regionalen Virtuellen Kraftwerks auf Basis der Mikro-KWK-Technologie“\* sind 17 Feldtestliegenschaften im Nordwesten Deutschlands im Versorgungsgebiet EWE AG geplant. Die Liegenschaften sind Einfamilienhäuser mit einer Wohnfläche von 120 bis 300 m<sup>2</sup>. Hierbei handelt es sich um 2 - 5 Personenhaushalte mit einem thermischen Verbrauch von 12000 bis 60000 kWh/a und einem elektrischen Verbrauch von 2500 bis 20000 kWh/a. 15 Liegenschaften werden mit einer Mikro-KWK Anlage des Typs EcoPower 1.0 der Firma Vailant ausgestattet. Die anderen mit einer Brennstoffzelle. Die heizungstechnische Anlage beinhaltet weiterhin ein Zusatzheizgerät (Spitzenlastkessel) sowie einen Parallelpufferspeicher ( $V_{sp} = 300\text{ l}, 500\text{ l}, \text{ bzw. } 800\text{ l}$ ) mit einem integrierten elektrischen Heizstab ( $P_n = 6\text{ kW}$ ). Dadurch steht sowohl ein elektrischer Erzeuger als auch ein Verbraucher zur Verfügung, um den thermischen Energiebedarf des Gebäudes zu decken. Dies erhöht die Flexibilität des gesamten Systems.

Systematisch werden die benötigten Informationen in jeder Liegenschaft erfasst und durch Aggregation in verschiedenen Ebenen zum RVK-Backend übertragen. Die EWE AG vermarktet die Flexibilität der Energieerzeugung und erstellt einen Fahrplan für das gesamte System. Dieser wird anschließend auf die Liegenschaften verteilt [1]. Messtechnisch sind für jede Liegenschaft die folgenden Daten zu erfassen:

- der Wärmebedarf für Warmwasser und Heizung
- die Wärmemengenströme des KWKs und des Zusatzheizgerätes
- die Elektroenergieeinspeisung des KWKs

---

\*FKZ:03ET1280A

- der Elektroenergiebezug des Heizstabs und der allgemeinen Verbrauch im Haus.

### Messkonzept

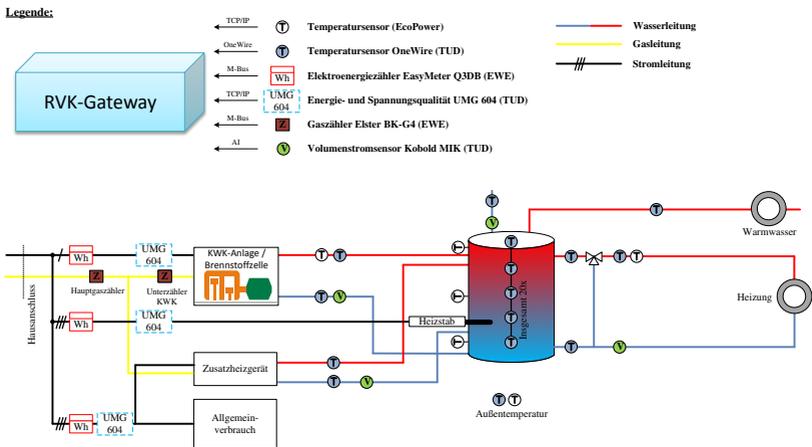


Bild I: Messkonzept

Dementsprechend wurde das Messkonzept, welches im Bild I dargestellt ist, entwickelt. Für die Temperaturerfassung werden in jedem Haus zusätzlich zu den bereits vorhandenen, beispielsweise in EcoPower integrierte Temperatursensoren, noch 28 digitale Halbleiter-Temperatursensoren des Typs DS1820S+ mit einem Messbereich von  $-55$  bis  $125$  °C verwendet. Zur Erfassung der Speichertemperaturen werden 20 dieser Sensoren mit einem Abstand von 10 cm am Speicher angebracht. Die anderen acht Sensoren werden zur Bilanzierung der jeweiligen Anschlüsse vom Pufferspeicher zur KWK-Einheit, zum Zusatzheizgerät, zur Trinkwassererwärmung und zum Heizkreis verwendet. Zur Bestimmung des Wärmeenergieflusses jedes Speicheranschlusses werden vier magnetisch-induktive Durchflussmesser (MIK-5NA-20-AL343) der Firma Kobold angebracht. Für die Erfassung der Elektroenergie- sowie Gaszufuhr werden die Elektroenergiezähler EasyMeter Q3DB und die Gaszähler Elster BK-G4 verwendet. Von den 17 Liegenschaften werden 10 Testgebäude mit den hochauflösenden Netzanalysatoren UMG 604 ausgestattet. Sie dienen zur Analyse des Nutzerverhaltens, zur Bewertung der Netzrückwirkungen auf das Betriebsverhalten der Anlagen und der Beeinflussung der elektrischen Netze durch den RVK-Betrieb.

- [1] J. Seifert, P. Schegner, A. Meinzenbach, J. Haupt, P. Seidel, L. Schinke, T. Heß, J. Werner, *Regionales Virtuelles Kraftwerk auf Basis der Mini- und Mikro-KWK Technologie*. Abschlussbericht. TU Dresden 2013.
- [2] J. Seifert, P. Schegner, A. Meinzenbach, J. Haupt, P. Seidel, J. Werner, L. Ma, G. Koletzke, A. Tolksdorf, R. Drexler, B. Jünemann, *Praxiserprobung des Regionalen Virtuellen Kraftwerks auf Basis der Mikro-KWK Technologie*. 1. Zwischenbericht. Dresden, Oldenburg 2015.



Maximilian Schmidt, Dipl.-Ing.

### Regionaler zellulärer Verbund von Versorgungseinheiten mit Netzregelfunktionen\*

Um einen stabilen Netzbetrieb zu gewährleisten, halten die Übertragungsnetzbetreiber Reserveleistung in Form von Primär-, Sekundär- und Tertiärregelleistung vor. Aktuell werden diese Regelleistungsarten fast ausschließlich von konventionellen Großkraftwerken erbracht. Zukünftig sind alternative Ansätze zur Bereitstellung von Regelleistung erforderlich. Zum einen führt das volatile Einspeiseverhalten regenerativer Energieanlagen zu einem gestiegenen Bedarf an Regelenergie. Zum anderen werden konventionelle Anlagen sukzessive vom Elektrizitätsmarkt verdrängt und stehen somit nicht mehr zur Bereitstellung von Regelleistung zur Verfügung. Ein Ansatz ist die Bereitstellung von Regelleistung mit Hilfe von aggregierten Klein-Erzeugungsanlagen, deren Zusammenschluss nachfolgend als Kraftwerkszelle (KWZ) bezeichnet wird. Typische Klein-Erzeugungsanlagen einer KWZ sind Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), Photovoltaik-Anlagen (PV) und elektrische Speicher.

Die Überwachung und Koordination der Einzelanlagen einer KWZ erfolgt dabei durch eine zentrale Steuer- und Überwachungseinheit, die sowohl Messgrößen erfasst als auch Steuersignale an die Einzelanlagen sendet (Bild I).

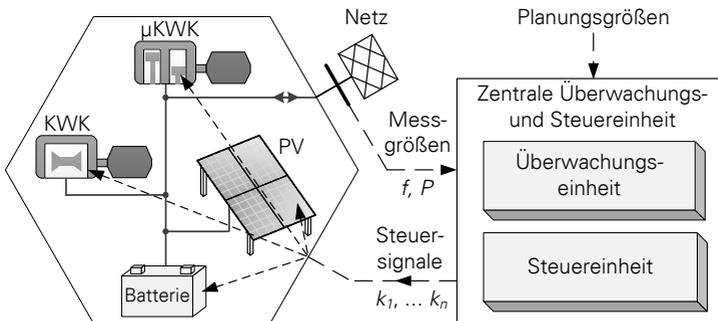


Bild I: Kraftwerkszelle und zentrale Überwachungs- und Steuereinheit

Der Vorteil einer KWZ in Hinblick auf die Primärregelung ist, dass signifikant kürzere Reaktionszeiten sowie höhere Leistungsgradienten erzielt werden können. Die Primärregelung ist eine Anlagenregelung, die aus der lokalen Frequenzabweichung eine definierte Leistungsänderung bestimmt. Dabei wird die Proportionalität durch die Leistungszahl  $k$  beschrieben, welche die Dimen-

\*Projekt im Rahmen der Maßnahme „Support-the-Best“ gefördert aus den Mitteln der Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder.

sion  $[P]/[f]$  besitzt. Diese Anlagenregelung muss bei jeder Anlage der KWZ installiert sein.

Die Aufgabe der zentralen Steuer- und Überwachungseinheit ist es, die erbrachte Regelleistung der KWZ zu überwachen und gegebenenfalls die Leistungszahl der Anlagenregelungen anzupassen.

Die Überwachungseinheit bestimmt aus der gemessenen Frequenzabweichung  $\Delta f$  und der vertraglich vereinbarten Leistungszahl die geforderte Primärregelleistung der KWZ. Bei einer Differenz zwischen geforderter und der tatsächlich erbrachter Regelleistung wird über eine Regelschleife die fehlende Leistungszahl ermittelt. Anschließend verteilt die Steuereinheit die Gesamtleistungszahl auf die Einzelanlagen.

Im Folgenden wird das Verhalten einer KWZ, bestehend aus einem Batteriespeicher, zwei Mikro-KWK-Anlagen und einer KWK-Anlage größerer Leistung, mit Hilfe einer Simulation gezeigt (Bild II).

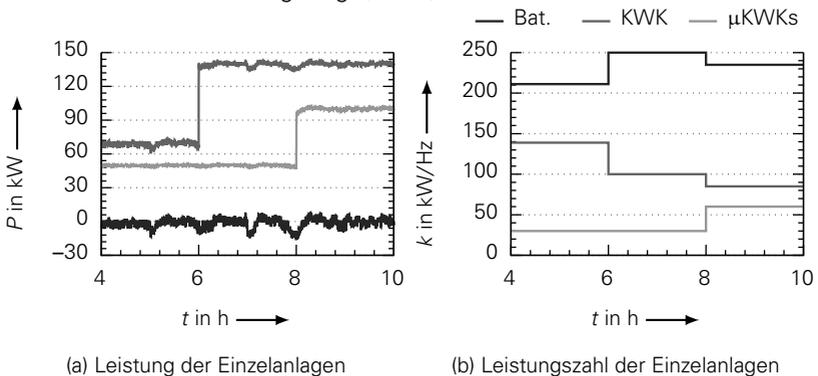


Bild II: Simulationsergebnisse mit Frequenzmessdaten vom 29.09.2012

Die Leistung einer Einzelanlage setzt sich aus dem Arbeitspunkt und einer frequenzabhängigen Komponente zusammen.

Zum Zeitpunkt  $t = 6$  h wird der Arbeitspunkt der KWK-Anlage verschoben. Während die Beteiligung der KWK-Anlage infolge der Arbeitspunktverschiebung sinkt, wird die Leistungszahl des Batteriespeichers erhöht, um die Gesamtleistungszahl  $k_{KWZ} = 380$  kW/Hz einzuhalten. Da zu diesem Zeitpunkt bereits die maximale Reserveleistung der  $\mu$ KWK-Anlage angeboten wird, ist eine höhere Beteiligung dieser Anlage nicht möglich. Bei  $t = 8$  h wird eine zweite  $\mu$ KWK-Anlage hinzugeschaltet, woraufhin die Beteiligung der  $\mu$ KWK-Anlagen an der Primärregelung steigt. Folglich sinken die Leistungszahlen des Batteriespeichers und der KWK-Anlage.

Die Simulation zeigt, dass trotz einer Arbeitspunktverschiebung und die Aufnahme einer weiteren Anlagen zur KWZ die insgesamt geforderte Leistungszahl zu jedem Zeitpunkt eingehalten wird.

### 3.1.2 Publikationen

#### Vorträge

Bauer, H.:

*Berechnungen zur Sicherheit von Gebäudeinstallationen.* 83. Sitzung des VDE-Ausschusses „Sicherheits- und Unfallforschung“, Frankfurt am Main, 02.10.2015

Dickert, J.:

*Podiumsdiskussion Kosten für Netzausbau und Energiewende mit Dr. C. Matthes, M. Streckler und H. Loew.* Bürgerkonferenz, Fulda, 14.09.2015

Dickert, J.:

*Der Zellulare Ansatz – Grundlage einer erfolgreichen, regionenübergreifenden Energiewende.* 2. Bayerischer Energiedialog, Schloss Hohenkammer (bei München), 20.10.2015

Dickert, J.:

*Der Zellulare Ansatz – Grundlage einer erfolgreichen, regionenübergreifenden Energiewende.* Tag der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik, TU Dresden, Dresden, 02.10.2015

Erdmann, N.; Schegner, P.:

*Analyse des zukünftigen Transportbedarfs für eine regenerative Energieversorgung.* Dresdner Konferenz Zukunft Energie, Dresden, 10.-11.11.2015

Heß, T.:

*Thermische Speicher zur Flexibilisierung von dezentralen Erzeugungsanlagen.* 3. Sächsisches Forum für Brennstoffzellen und Energiespeicher, Leipzig, 28.01.2015

Heß, T.:

*Optimization of electrical network utilization using thermal storages.* 3rd Dresden Conference Energy in Future, Dresden, 10.-11.11.2015

Heß, T.:

*Thermische Speicher zur Flexibilisierung von dezentralen Erzeugungsanlagen.* Tag der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik, TU Dresden, Dresden, 02.10.2015

Meyer, J. et al.:

*Challenges in the frequency range 2-150 kHz*. VIII International Symposium on Power Quality, Valparaiso, Chile, 17.-20.11.2015

Meyer, J. et al.:

*Power Quality challenges in future distribution networks (from a German/European perspective)*. 2015 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Wollongong, Australien, 27.-30.09.2015

Meyer, J. et. al.:

*Impact of modern equipment on harmonic emission in low voltage networks*. Business breakfast at South African Institute of Electrical Engineers, Johannesburg, South Africa, 42222

Meyer, J. et al.:

*Modelling of emission of PV inverters and Electric vehicles based on measurements*. 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, USA, 26.-30.07.2015

Meyer, J; Möller, F.:

*Tutorial on Harmonics in distribution networks (several presentations)*. 23rd International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Lyon, Frankreich, 15.-18.05.2015

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

*Tutorial on Challenges of harmonic emission in future distribution networks*. VIII International Symposium on Power Quality, Valparaiso, Chile, 17.-20.11.2015

Meyer, J. et al.:

*Round table on Power Quality and EMC in the Future Grids: Challenges due to PV generation and EV charging*. 23rd International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Lyon, Frankreich, 15.-18.05.2015

Meyer, J.:

*Voltage Quality Monitoring in Presence of Big Data*. Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (CBQEE), Campina Grande, Brasilien, 07.-10.07.2015

Meyer, J. et al.:

*Sensor Accuracy and Data Management Issues*. 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, USA, 26.-30.07.2015

Romero-L, M. F.; Gallego, L. E.; Müller, S.; Meyer, J.:  
*Characterization of Non-linear Household Loads for Frequency Domain Modeling*. VIII International Symposium on Power Quality,  
Valparaiso, Chile, 17.-20.11.2015

Jimenez, Y.; Duarte, C.; Petit, J.; Meyer, J.; Schegner, P.; Carrillo, G.:  
*Steady State Signatures in the Time Domain for Nonintrusive Appliance Identification*. VIII International Symposium on Power Quality,  
Valparaiso, Chile, 17.-20.11.2015

Möller, F.:  
*Einfluss von Elektrofahrzeugen auf die Elektroenergiequalität in Niederspannungsnetzen*. Tag der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik, TU Dresden  
Dresden, 02.10.2015

Palm, S.:  
*Einfluss des Zubaus dezentraler Erzeugungsanlagen auf die Bildung von elektrischen Inselnetzen*. Tag der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik,  
TU Dresden, 02.10.2015

Schegner, P.:  
*Cellular Energy Networks - enabling regional balancing of renewable energies*. International Summer School Storage 4 Energy,  
Dresden, 5.-10.10.2015

Schegner, P.:  
*Energiespeicher - Voraussetzung für eine umweltfreundliche Energieversorgung*. 14. Technischer Tag der VEM-Gruppe,  
Wernigerode, 15.-16.09.2015

Schegner, P.:  
*Anwendungserfahrungen der Sternpunktbehandlung*. Fachtagung Sternpunktbehandlung VSE,  
Olten, Schweiz, 10.09.2015

Schegner, P.:  
*Der Zellulare Ansatz - Grundlage einer erfolgreichen, regionenübergreifenden Energiewende*. Aktuelle Fragen der Energieversorgung,  
Graz, Österreich, 20.11.2015

Schegner, P.:  
*Das Forschungscluster CSSI - Energiespeicher-Forschung an der TU Dresden*. 10. Silicon Saxony Day,  
Dresden, 07.06.2015

Schegner, P.:

*Energiespeicher für die Energieversorgung von morgen.* Siemensday an der TU Dresden,  
Dresden, 23.06.2015

Schegner, P.:

*Energiespeicher für eine erneuerbare Energieversorgung.* ENSO Netz-Meistertag 2015,  
Neustadt in Sachsen, 19.06.2015

Schegner, P.:

*Grenzübergreifende Zusammenarbeit in der Energietechnik.* Sächsisch-Tschechischer Innovationstag,  
Prag, Tschechische Republik, 29.10.2015

Schegner, P.: *The Cellular Approach –The Basis of Successful, Cross-Regional Energy Transition.* ETG-Kongress 2015,  
Bonn, 17.-18.11.2015

Schegner, P.:

*Der Zellulare Ansatz – Grundlage einer erfolgreichen, regionenübergreifenden Energiewende.* ETG-Mitgliederversammlung ETG-Kongress,  
Bonn, 17.-18.11.2015

Schnelle, T.; Schegner, S.:

*Modulare Netze zum netzdienlichen Betrieb dezentraler Speicher.* Dresdner Konferenz Zukunft Energie,  
Dresden, 10.-11.11.2015

Schnelle, T.:

*Modulare Netze – Neue Alternativen für Planung und Betrieb von Verteilernetzen.* Dresdner Kreis,  
Hannover, 25.03.2015

Werner, J.; Gerhardt, N.:

*Strom im Wärmemarkt - was ändern die Erneuerbaren Energien?.* Hannover Messe 2015 - Life needs Power,  
Hannover, 16.04.2015

Werner, J.:

*Das Regionale Virtuelle Kraftwerk - optimale Integration dezentraler Wärmeerzeuger.* Hannover Messe 2015 - Life needs Power,  
Hannover, 14.04.2015

## Veröffentlichungen

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

*Impact of measurement setup and test load on the accuracy of harmonic current emission measurements.* IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Pisa, Italien, 11.-14.05.2015

Blanco, A.M.; Müller, S.; Grevenner, A.; Meyer, J.; Schegner, P:

*Stochastic harmonic load model of residential users based on measurements.* IEEE Conference PowerTech, Eindhoven, Niederlande, 29.06.-02.07.2015

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

*The impact of supply voltage distortion on the harmonic current emission of non-linear loads.* Journal of the Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia - Medellin Campus. Vol. 82, Issue 192, Aug. 2015

Blanco, A.M.; Meyer, J.; Pavas, A.; Garzon, C.A.; Romero, M.; Schegner, P:

*Harmonic distortion in public low-voltage grids - Comparison of the situation in Colombia and Germany.* VIII International Symposium on Power Quality, Valparaiso, Chile, 17.-20.11.2015

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

*The Voltage Control for Reactive Power Management by Decentralized Wind Farms.* IEEE Conference PowerTech, Eindhoven, Niederlande, 29.06.-02.07.2015

Dickert, J.; Schegner, P:

*Evolution and future prospects of electricity demand for residential customers.* 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, USA, 26.-30.07.2015

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

*Seasonal Variations in Long-Term Measurements of Power Quality Parameters.* IEEE Conference PowerTech, Eindhoven, Niederlande, 29.06.-02.07.2015

Domagk, M.; Zyabkina, O.; Meyer, J.; Schegner, P:

*Trend Identification in Power Quality Measurements.* 2015 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Wollongong, Australien, 27.-30.09.2015

Erdmann, N.; Schegner, P.:

*Visual Approach to assess the Environmental Impact of Overhead Transmission Lines.* Internation Youth Conference on Energy (IYCE 2015), Pisa, Italien, 27.-30.05.2015

Erdmann, N.; Dickert, J.; Schegner, P.:

*Abschätzung des Energietransportbedarfs bei ausschließlicher Einspeisung aus erneuerbaren Energiequellen.* Konferenz für Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern (NEIS 2015), Hamburg, 10.-11.09.2015

Hess, T.; Schegner, P.:

*Power schedule planing and operation algorithm of the Local Virtual Power Plant based on  $\mu$ CHP-devices.* 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, USA, 26.-30.07.2015

Lückert, J.; Heß, T.; Pieper, C.:

*Regionaler zellularer Verbund von Versorgungseinheiten mit Netzregelungsaufgaben.* 47. Kraftwerkstechnisches Kolloquium 2015, Dresden, 13.-14.10.2015

Alahäivälä, A.; Heß, T.; Cao, S.; Lehtonen, M.:

*Analyzing the optimal coordination of a residential micro-CHP system with a power sink.* Applied Energy Bd. 149, S. 326-337, 2015

Jäschke, C.; Schegner, P.:

*Analytic Computation of the Magnetizing Inductance of Current Instrument Transformers under Consideration of Eddy Currents.* IEEE Transactions on Magnetics, November 2015

Jäschke, C.; Schegner, P.:

*A Measuring System to Identify the Frequency Response of High Current Instrument Transformers.* International Conference on Modern Electric Power Systems (MEPS 2015), Wroclaw, Poland, 06.-09.06.2015

Jäschke, C.; Schegner, P.:

*Metrological Frequency Response Analysis of a High Current Instrument Transformer.* 9th International Conference on Sensing Technology (ICST 2015), Auckland, New Zealand, 08.-10.12.2015

Mohns, E.; Fricke, S.; Jaeschke, C.; Schegner, P.:

*A Current Clamp based High Voltage Monitoring System*. IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS 2015), Aachen, Germany, 23.-25.9.2015

Klatt, M.; Wolf, R.; Meyer, J.; Wittenberg, B.; Schegner, P.:

*Filter for the Measurement of Supraharmonics in Public Low Voltage Networks*. Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe, Dresden, 16.-22.08.2015

Möller, F.; Müller, S.; Meyer, J.; Schegner, P.; Wald, C.; Isensee, S.:  
*Impact of Electric Vehicle Charging on Unbalance and Harmonic Distortion – Field Study in an Urban Residential Area*. 23rd International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Lyon, Frankreich, 15.-18.05.2015

Djokic, S.; Meyer, J.; Möller, F.; Langella, R.; Testa, A.:

*Impact of Operating Conditions on Harmonic and Interharmonic Emission of PV Inverters*. 2015 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS 2015), Aachen, 23.-25.9.2015

Müller, S.; Meyer, J.; Schegner, P. ; Djokic, S.:

*Harmonic Modeling of Electric Vehicle Chargers in Frequency Domain*. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPO'15), La Coruna, Spanien, 25.-27.03.2015

Palm, S.:

*Grundlagen der Detektierbarkeit und Detektionsverfahren von Inselnetzen*. Tagungsband Enersax (Energiewende Sachsen - Aktuelle Herausforderungen und Lösungsansätze), Dresden, 09.12.2014

Palm, S.; Schegner, P.:

*Methoden zur Detektion unbeabsichtigter Inselnetze*. ew - Magazin für die Energiewirtschaft 5/2015, Frankfurt am Main, 29.04.2015

Palm, S.; Schegner, P.:

*Fundamentals of Detectability and Detection Methods of Unintentional Electrical Islands*. IEEE Conference PowerTech, Eindhoven, Niederlande, 29.06.-02.07.2015

Schmidt, M.; Heß, T.; Schegner, P.:  
*Regionaler zellulärer Verbund von Versorgungseinheiten mit koordinierter Primärregelungsfunktion*. 47. Kraftwerkstechnisches Kolloquium 2015, Dresden, 13.-14.10.2015

Schnelle, T.; Schmidt, M.; Schegner, S.:  
*Power Converters in Distribution Grids – New Alternatives for Grid Planning and Operation*. IEEE Conference PowerTech, Eindhoven, Niederlande, 29.06.-02.07.2015

Schöttke, S.; Rademacher, S.; Meyer, J.; Schegner, P.:  
*Transfer Characteristic of a MV/LV Transformer in the Frequency Range between 2 kHz and 150 kHz*. Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe, Dresden, 16.-22.08.2015

Stiegler, R.; Chakravorty, D.; Meyer, J.; Schegner, P.:  
*Measurement of network harmonic impedance in presence of electronic equipment*. IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS 2015), Aachen, 23.-25.9.2015

Werner, J.; Gerhardt, N.; Kleimaier, M. et.al.:  
*Potenziale für Strom im Wärmemarkt bis 2050 - Wärmeversorgung in flexiblen Energieversorgungssystemen mit hohen Anteilen an erneuerbaren Energien*. VDE Studie, Frankfurt am Main, 06.2015

Jimenez, Y.; Duarte, C.; Petit, J.; Carrillo, G.; Meyer, J.; Schegner, P.:  
*Characterization of current switching transients for appliance identification*. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPO'15), La Coruna, Spanien, 25.-27.03.2015

Zavoda, F.; Rönning, S.; Bollen, M.; Meyer, J.; Desmet, J.:  
*CIGRE/CIREN/IEEE WORKING GROUP C4.24 – New Measurement Techniques in the Future Grid – Status Report*. 23rd International Conference on Electricity Distribution (CIREN), Lyon, Frankreich, 15.-18.05.2015

Bollen, M.; Bahramirad, S.; Khodaei, A.; Meyer, J.; Langella, R.; Hasler, J.-P.; Zavoda, F.; Liu, J.:  
*Volt-Var Control and Power Quality (CIGRE/CIREN/IEEE C4.24)*. 23rd International Conference on Electricity Distribution (CIREN), Lyon, Frankreich, 15.-18.05.2015

Meyer, J.; Holenstein, H.; Egger, S.; Gasch, E.; Domagk, M.:  
*Nequal-Web-Based Voltage Quality Monitoring in Switzerland*. 23rd  
International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Lyon,  
Frankreich, 15.-18.05.2015

Xu, X.; Molin, H.; Kourtza, P.; Collin, A.; Harrison, G.; Djokic, S.; Meyer, J.;  
Müller, S.; Möller, F.:  
*Component-based modelling of EV battery chargers*. IEEE Conference  
PowerTech, Eindhoven, Niederlande, 29.06.-02.07.2015

Yanchenko, S.; Meyer, J.:  
*Harmonic Emission of Household Devices in Presence of Typical Voltage  
Distortions*. IEEE Conference PowerTech, Eindhoven, Niederlande,  
29.06.-02.07.2015

Meyer, J.; Stiegler, R.; Schegner, P.; Kilter, J.:  
*Impact of Voltage Instrument Transformers on the Accuracy of Harmonic  
Measurements in a 330-kV-Transmission Grid*.OMICRON Instrument  
Transformer and Measurement Forum,  
Feldkirch, Österreich, 14.-15.09.2015

Gasch, E.; Meyer, J.; Schegner, J.; Schmidt, K.:  
*Efficient Power Quality Analysis of Big Data (Case Study for a Distribution  
Network Operator)*. 23rd International Conference on Electricity  
Distribution (CIRED),  
Lyon, Frankreich, 15.-18.05.2015

Druml, G.; Schegner, P; Fickert, L.; Schlömmer, M.:  
*Advantages of the new Combination: Petersen-Coil and  
Faulty-Phase-Earthing*. 23rd International Conference on Electricity  
Distribution (CIRED),  
Lyon, Frankreich, 15.-18.05.2015



## 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 Elektroenergie-technik
- Berechnen des thermischen Verhaltens von Betriebsmitteln der Elektroenergie-technik 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 Wechsel- und 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

Aufgrund der Entwicklungen auf dem Gebiet der Hochtemperatursupraleiter (HTSL) der zweiten Generation, in Form von REBCO Bandleitern, eröffnen sich neue Einsatzmöglichkeiten in Betriebsmitteln der Elektroenergie-technik, wie z. B. supraleitenden Strombegrenzern, Generatoren oder Motoren. Die in diesen Betriebsmitteln eingesetzten stromtragenden Verbindungen aus Normalleitern und/oder Supraleitern müssen für den Einsatz bei siedendem Flüssigstickstoff ( $\text{LN}_2$ ,  $\vartheta_S = -195,8^\circ\text{C}$ ) geeignet sein.

Es wurden daher Verbindungen mit den Fügetechnologien Klemmen (Klm), Kleben (Klb) und RMS-Löten (RMS = reactive nano meter multilayers - Lot) mit unterschiedlichen Materialpaarungen hergestellt und untersucht. Dabei wurden normalleitende Bänder aus Kupfer (Cu), versilberte Kupferbandleiter (Ag) und HTSL mit Silber- oder Kupferdeckschicht eingesetzt. [1]

Der Widerstand einer stromtragenden Verbindung wird mit dem Verbindungswiderstand  $R_V$  charakterisiert. Um die unterschiedlichen Fügetechnologien und Materialpaarungen miteinander vergleichen zu können, wurde für alle hergestellten Verbindungsvarianten ein identisches Messprinzip angewandt (Bild I).

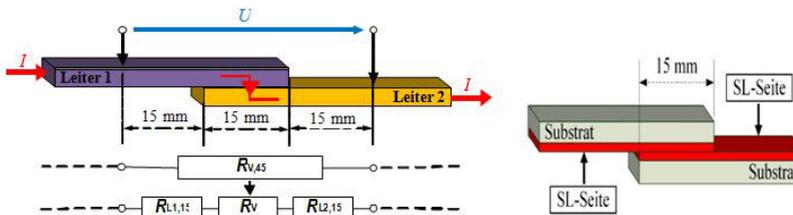


Bild I: Verwendetes Messprinzip (links) sowie Anordnung der HTSL (rechts)

Die Überlappungslänge  $l_0$  der einzelnen Leiter wurde zu  $l_0 = 15\text{ mm}$  gewählt und der Widerstand  $R$  jeweils im Abstand  $l$  von  $l = 45\text{ mm}$  gemessen. Daraus wurde anschließend der Verbindungswiderstand  $R_V$  berechnet. Zum Fügen der Verbindungen mit HTSL wurde die sogenannte „Face-to-Face“ Methode angewandt, bei der jeweils die beiden supraleitenden Schichten zueinander zeigen. [2]

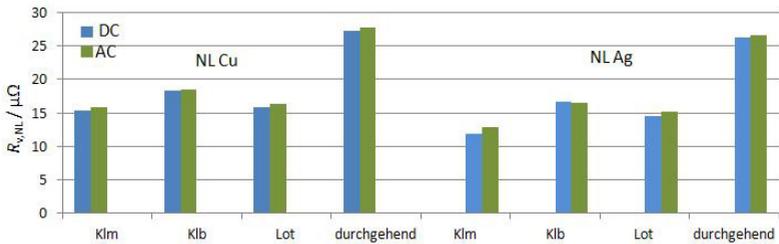


Bild II: Gemessener Verbindungswiderstand  $R_{V,NL}$  von Normal-Leiterverbindungen in Flüssigstickstoff

Es ist generell festzustellen, dass bei allen Fügeverfahren mit Normalleitern ein geringerer Verbindungswiderstand  $R_{V,NL}$  ermittelt wurde als im gleichen Abstand an einem durchgängigen Leiter (Bild II). Der Gütefaktor ist daher  $k_U < 1$ .

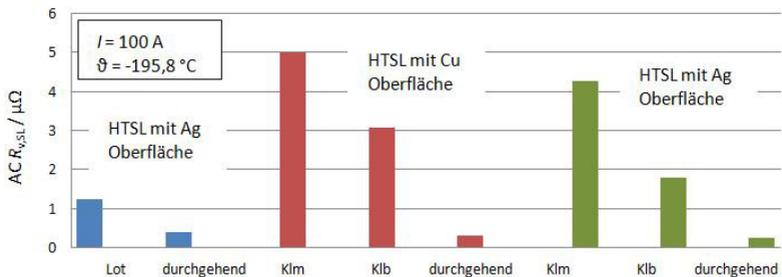


Bild III: Gemessener AC Verbindungswiderstand  $R_{V,SL}$  von supraleitenden Verbindungen in Flüssigstickstoff

Bei allen Fügeverfahren mit HTSL verschlechtert sich der Verbindungswiderstand  $R_{V,SL}$  im Vergleich zu dem im gleichen Abstand an einem durchgängigen HTSL gemessenem Widerstand (Bild III). Gute Ergebnisse wurden jedoch mit RMS-Löten, wie auch Kleben erzielt.

[1] K. Bäuml: *Jahresbericht 2014*, Dresden, 2014

[2] K. Bäuml, S. Großmann: *Investigations on different joining techniques regarding electrical joints with normal conducting material and YBCO coated conductors*, European Conference on Applied Superconductivity, Lyon, 2015.



Sebastian Dreier, Dipl.-Wi.-Ing.

Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Fremdschichten auf elektrische Kontakte

Verbindungen und Kontakte der elektrischen Energietechnik können durch verschiedene Mechanismen altern. Infolge dieser Alterungsmechanismen wird der Verbindungs- und Kontaktwiderstand größer. Ein Alterungsmechanismus ist das Bilden von Fremdschichten infolge chemischer Reaktionen. Nach dem Reinigen können sich auf der Oberfläche von Werkstoffen der elektrischen Energietechnik Fremdschichten bilden, die abhängig von der Zeit und der Temperatur wachsen. In vorangegangenen Untersuchungen wurde bereits gezeigt, dass die Separation der Alterungsmechanismen für das Verständnis der zugrundeliegenden physikalischen Prozesse hilfreich ist. Es wurden Langzeitversuche gekreuzter Zylinder mit konstanter Kontaktkraft aufgebaut und der Kontaktwiderstand  $R(t)$  abhängig von der Zeit gemessen. Andere Alterungsmechanismen werden durch geeignete Maßnahmen in Versuchsaufbau und Versuchsplan unterdrückt. In Versuchen im Wärmeschrank bei  $200\text{ °C}$  mit gekreuzten Kupferzylindern (Cu-ETP,  $d = 10\text{ mm}$ ) bis 1000 h wurde der Fremdschichteinfluss in der Formierungsphase untersucht (Bild I).

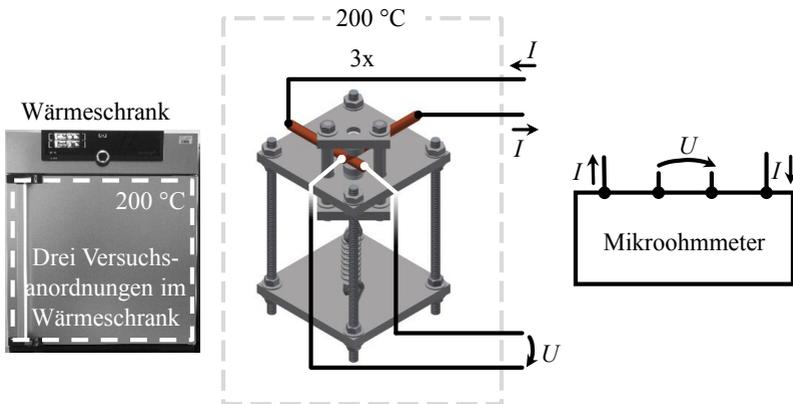


Bild I: Versuchsaufbau für drei Kontaktpaare gekreuzter Zylinder aus Kupfer im Wärmeschrank

In Bild II ist erkennbar, dass der Radius  $r(t)$  der elektrisch wirksamen Kontaktfläche, berechnet aus dem gemessenen Kontaktwiderstand  $R(t)$ , nach Abschluss der Formierungsphase einen stabilen Wert erreicht. Im Mikroskopbild sind dicke Fremdschichten (dunkel gefärbt) um den Kontaktpunkt sicht-

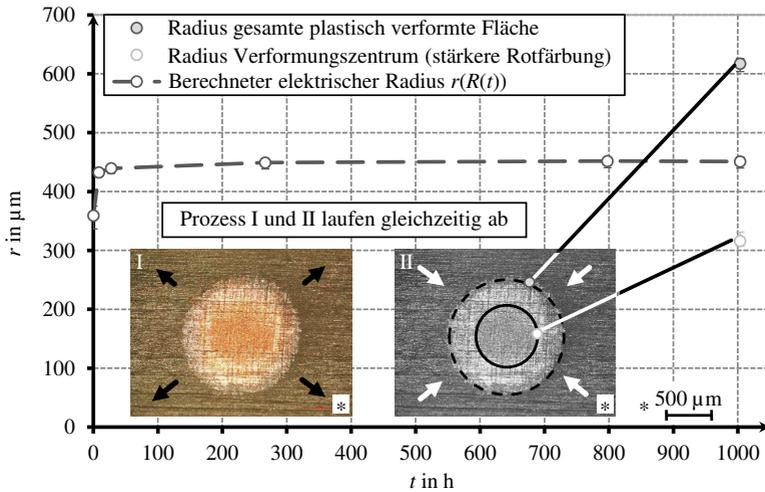


Bild II: Radius abhängig von der Zeit

bar. Nach 1000 h wurde die Wärmebehandlung abgeschlossen und die Kontakte geöffnet und mikroskopiert. Die gesamte plastisch verformte Fläche setzt sich aus fremdschichtfreien und fremdschichtbedeckten Bereichen zusammen (Bild II). Im Verformungszentrum ist eine deutlichere Rotfärbung erkennbar. Die Größe dieser Fläche entspricht in etwa den plastisch verformten Flächen von Kontakten, die im Ausgangszustand mikroskopisch untersucht wurden. Thermisch aktivierte Fließprozesse (Bild II, Prozess I) führen während der Versuchsdauer zu einer Zunahme der plastisch verformten Fläche und einer Abnahme des Kontaktwiderstands. Gleichzeitig wächst die Fremdschicht wesentlich langsamer in Richtung des Verformungszentrums (Bild II, Prozess II). Beide Prozesse laufen kontinuierlich und zeitgleich ab. Der Gradient der Zunahme des Kontaktwiderstands wird null, wenn die Fremdschicht auf der Oberfläche nicht mehr durch das nachgebende Material aufgebrochen werden kann. Ab diesem Zeitpunkt führt die Vergrößerung der plastisch verformten Fläche nicht zu einer weiteren Zunahme des elektrisch wirksamen Radius. Der Kontaktwiderstand bleibt konstant. Der Fließprozess ist u. a. kraftabhängig und läuft mit zunehmender Kontaktfläche langsamer ab.

In den Untersuchungen konnte der begrenzende Einfluss des Fremdschichtwachstums auf den Kontaktwiderstand in der Formierungsphase gezeigt werden. Fremdschichten, die weicher sind als das Grundmaterial, können während des Fließprozesses zerdrückt werden. In diesem Fall bestimmen die Temperatur und die Kontaktkraft den Fließprozess. Dieser Effekt wurde in Langzeitversuchen mit versilberten Kupferzylindern beobachtet.



**Torsten Fuhrmann, Dipl.-Ing.**

**Entwicklung neuer Aluminiumlegierungen als stromtragende Leiter für Verbindungen in der Elektroenergie-technik**

Der immer noch verhältnismäßig hohe Preis für Kupfer auf dem Weltmarkt führt dazu, dass viele Hersteller von Elektroenergieanlagen, Kupfer als Leitermaterial durch Aluminium substituieren, wenn es konstruktiv möglich ist. Beim Betrieb dieser Anlagen über mehrere Jahrzehnte ist das Langzeitverhalten der Verbindungen von stromtragenden Leitern zu berücksichtigen. Für den direkten Austausch der Leiterwerkstoffe sind die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften von Aluminium und Kupfer bedeutend. Insbesondere die dauerhaften Festigkeitseigenschaften bei höheren Temperaturen sind für Aluminium, infolge geforderter höherer Grenztemperaturen im Betrieb, herausfordernd. Um die Anforderungen im Dauerbetrieb erfüllen zu können, wurde ein öffentlich gefördertes Projekt initiiert, mit dem Ziel neue Aluminiumlegierungen zu entwickeln, die verbesserte Zeitstandeigenschaften für Betriebstemperaturen bis zu 140 °C bei gleichbleibend guten elektrischen Eigenschaften haben. Derzeit häufig in der Elektroenergie-technik eingesetzte und genormte Aluminiumlegierungen sind das EN AW 1350A (EAI99,5(A)) und das EN AW-6101B (EAIMgSi(B)). Beide werden als Referenz, zur Bewertung der Neuentwicklungen im Projekt, verwendet [DIN 40501-2:2005].

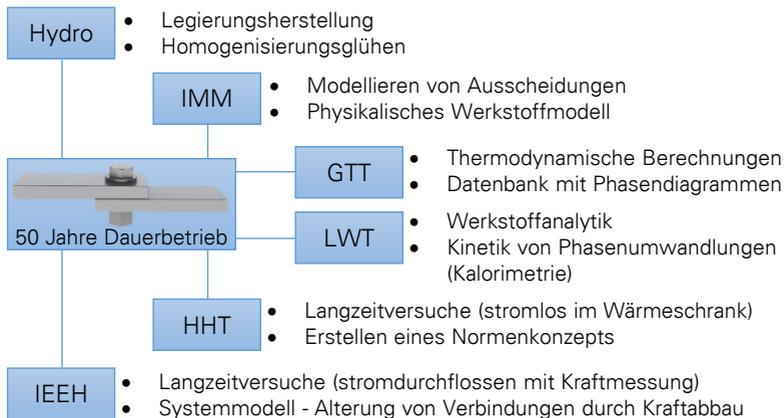


Bild I: Projektpartner\* und Aufgabendarstellung

\*Hydro Aluminium Rolled Products GmbH (Hydro); Institut für Metallkunde und Metallphysik (IMM); Gesellschaft für Technische Thermochemie und -physik (GTT); Universität Rostock: Lehrstuhl für Werkstofftechnik (LWT), Lehrstuhl für Hochspannungs- und Hochstromtechnik (HHT); TU Dresden: Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik (IEEH)

Für die neu zu entwickelnden Legierungen wird das Grundwissen über die Eigenschaften geeigneter Legierungselemente und Wärmebehandlungsverfahren benötigt. Hierzu wurde eine Forschungsgemeinschaft zusammengestellt, die die Legierungsentwicklung von der Herstellung über die Erprobung bis zur Modellbildung betrachtet (Bild I). Die Zeitstandfestigkeit hat insbesondere beim kraftschlüssigen Verbinden von stromtragenden Leitern, z. B. bei Schraubenverbindungen mit Stromschiene, einen wesentlichen Einfluss auf das Langzeitverhalten. Durch das Einbringen einer von außen wirkenden, mechanischen Belastung kann sich das Leitermaterial abhängig von der Zeit und Temperatur plastisch verformen. Die Folge kann eine so geringe Verbindungskraft sein, dass sich der Verbindungswiderstand  $R_V$  erhöht. Mit zunehmendem  $R_V$  erhöht sich die in der Verbindung erzeugte Verlustleistung und Temperatur, wodurch wiederum das Altern der Verbindung beschleunigt wird.

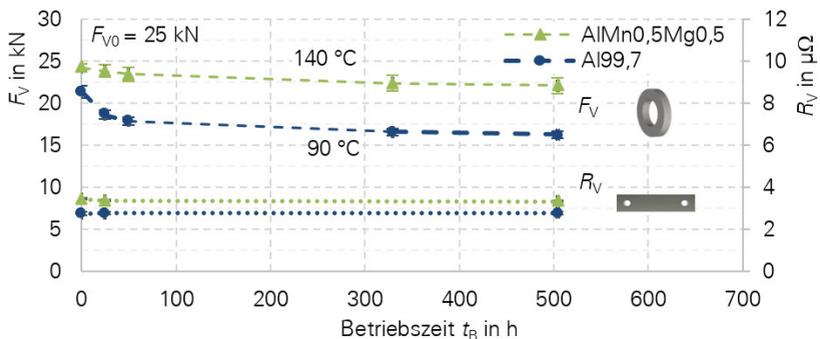


Bild II: Referenzversuche an Schraubenverbindungen mit Stromschiene

Die Bewertung der neuentwickelten Aluminiumlegierungen wird basierend auf Langzeitversuchen durchgeführt. An stromtragenden Verbindungen wird die Verbindungskraft  $F_V$  während der Versuchszeit bei konstanter Temperatur bis zu 140 °C und zyklisch der Verbindungswiderstand  $R_V$  im ausgeschalteten Zustand bei Raumtemperatur gemessen. Exemplarisch sind die Mittelwerte der gemessenen Verbindungskraft und des -widerstands von zehn Verbindungen für herkömmliche Legierungen dargestellt (Bild II). Die Verbindungswiderstände sind bisher für beide Materialien als technisch gut zu bewerten. Obwohl die Verbindungen mit Stromschiene aus Reinaluminium EN AW-1070 (Al99,7) bei einer geringeren Betriebstemperatur (90 °C) untersucht wurden, ist der Kraftabbau größer als bei denen mit der Aluminiumlegierung EN AW-3105 (AlMn0,5Mg0,5), die bei 140 °C betrieben wurde. Dies ist mit den unterschiedlichen Zeitstandeigenschaften beider Werkstoffe zu erklären. Bereits nach der Montage hat sich bei Raumtemperatur durch Setzprozesse die Kraft bei den Verbindungen mit Stromschiene aus Al99,7 im Vergleich zum AlMn0,5Mg0,5 stärker abgebaut. Zum Verifizieren eines Modells zur Berechnung des Kraftabbaus von Schraubenverbindungen mit Stromschiene und zur Prognose der Langzeitstabilität werden die Langzeitversuche fortgeführt und weitere Versuche mit neuen Legierungen ergänzt.



Michael Gatzsche, Dipl.-Ing.

### Elektrisch-thermisches Betriebsverhalten von Kontaktelementen für Hochstromanwendungen bei Belastung mit Kurzschlussstrom

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).

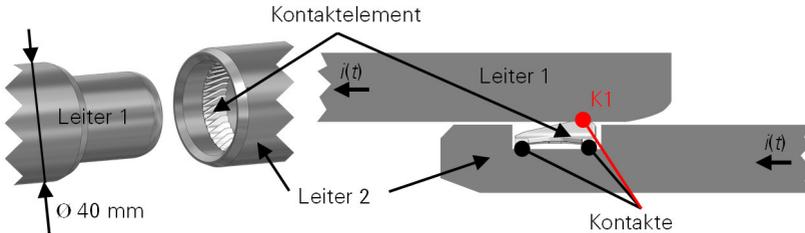


Bild I: Hochstromsteckverbindung mit federndem Kontaktelement

Im Dauerbetrieb müssen die Verbindungen den Bemessungs-Betriebsstrom  $I_r$  langzeitstabil führen. Im Fehlerfall müssen die Verbindungen kurzschlussfest sein. Die entscheidenden Kenngrößen des Kurzschlussstroms sind der Stoßkurzschlussstrom  $i_p$  (Momentanwert) und der Kurzschlusswechselstrom  $I_k$  für eine definierte Kurzschlussdauer  $t_k$ .  $I_k$  ist typischerweise eine Größenordnung, oft Faktor 20 größer als  $I_r$ . Der Kurzschluss stellt demnach eine große thermische Belastung für Kontaktelemente und Verbindungen dar und es ist für die Beurteilung der Kurzschlussfestigkeit wünschenswert, die Temperaturverläufe in den unterschiedlichen Bereichen der Verbindung zu kennen. Für solche elektrisch-thermischen Berechnungen an komplexen dreidimensionalen Geometrien werden oft numerische Rechenverfahren wie z. B. die Finite-Elemente-Methode verwendet. Die Kontakte stellen eine besondere Herausforderung für die numerische Berechnung dar, da Mikrogeometrie und Oberflächenzustand der sich berührenden Kontaktstücke nicht bekannt sind. In der Kontakttheorie existieren analytische Gleichungen, die das elektrisch-thermische Betriebsverhalten metallischer Kontakte geometrieunabhängig beschreiben. Diese Beziehungen wurden in die flächigen Kontaktpaare der FEM-Software ANSYS integriert [1]. Damit ist es möglich, die Temperaturverteilungen und -verläufe in einer Hochstromsteckverbindung bei Belastung mit einem typischen 1-s-Kurzschlussstrom zu berechnen. Dem 50-Hz-Wechselanteil ist ein abklingender Gleichanteil überlagert (Wirkung der Netzinduktivität bei Kurzschlusseintritt im Spannungsnulldurchgang). Es wird erkennbar, wie die verschiedenen Bereiche der Verbindung auf den Kurzschlussstrom reagieren (Bild II).

- Leiter: Ein großer stromtragender Querschnitt und eine große Wärmekapazität stehen zur Verfügung, demnach erwärmt sich der Leiter während des Kurzschlussdauer  $t_k = 1$  s lediglich um 9 K.
- Kontaktelement: Querschnitt und Wärmekapazität sind deutlich kleiner, die Erwärmung entsprechend größer als beim Leiter: Das Kontaktelement erwärmt sich um 177 K.
- Kontakt K1 (Bild I): Sehr große Stromdichten und fast keine Wärmekapazität führen dazu, dass die Erwärmung dem Momentanwert des Stroms folgt: Beim ersten und größten Strommaximum  $i_p = 51$  kA wird die Maximaltemperatur erreicht. Danach „pulsiert“ die Kontakttemperatur mit der doppelten Netzfrequenz 100 Hz.

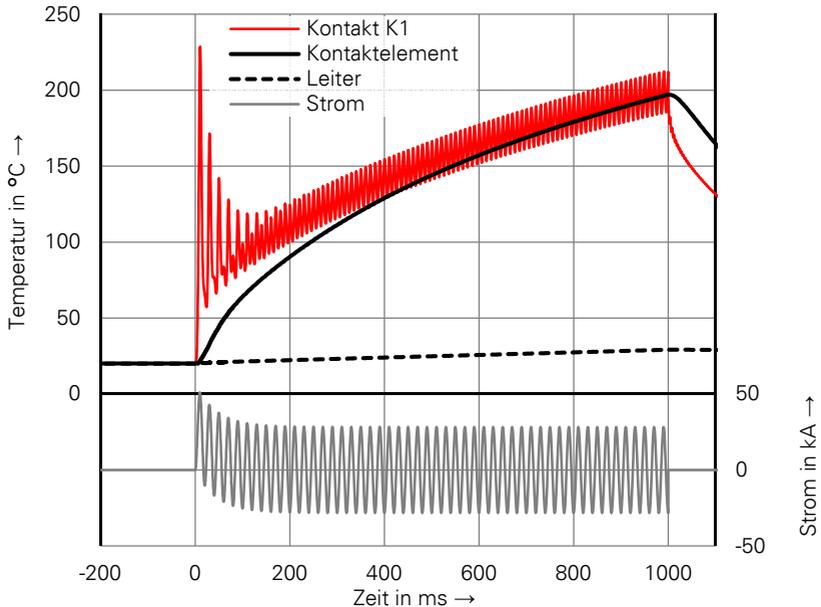
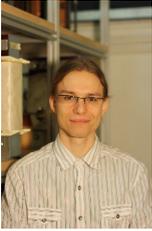


Bild II: Temperaturverläufe in der Steckverbindung bei Belastung mit 50-Hz-Kurzschlussstrom  $I_k = 20$  kA,  $t_k = 1$  s,  $i_p = 51$  kA

In Anlagen und Geräten der Elektroenergie-technik werden die Kontakte demnach bei Stoßkurzschlussströmen stark thermisch belastet. Durch das Parallelschalten mehrerer Kontakte wird die Belastung vermindert. Das Rechenmodell kann genutzt werden, um die Grenzen der Kurzzeitstromtragfähigkeit bestehender Kontaktsysteme zu berechnen und zielgerichtet optimierte Kontaktsysteme zu entwerfen.

[1] M. Gatzsche, N. Lücke, S. Großmann, T. Kufner, G. Freudiger, *Elektrisch-thermisches Betriebsverhalten von Kontaktelementen für Hochstromanwendungen bei Kurzzeitstrombelastung*, 23. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 2015.



Christian Hildmann, Dipl.-Ing.

**Einfluss des Kraftschlussanteils auf das Kontakt- und Langzeitverhalten von Pressverbindungen**

Eine Einflussgröße des elektrischen Kontakt- und Langzeitverhaltens von Pressverbindungen ist die Kraftwirkung auf die Kontaktpartner [1]. Dabei wird hinsichtlich der höchsten Presskraft  $F_{press}$ , die während des Fügens der Verbindung erreicht wird, und der bleibenden Kontaktkraft  $F_{res}$  in einer Verbindung unterschieden. Eine bleibende Kontaktkraft  $F_{res}$  bildet sich nur dann aus, wenn die elastische Rückfederung des Leiters gegenüber der Armatur größer ist. Zum Ermitteln der Spannungszustände in einer Pressverbindung während und unmittelbar nach dem Fügen sind aus der Literatur analytische Ansätze bekannt. Die darin vorgestellten Herleitungen gelten jedoch nur für vereinfachte Geometrien der Kontaktpartner und berücksichtigen die Lastzustände sowie das Werkstoffverhalten nur unzureichend. Mit dem Ziel, die Press- und die Kontaktkräfte in Pressverbindungen mit mehrdrätigen Verbundleitern zu ermitteln, wurde der Fügeprozess mit der FE-Methode modelliert und nachgebildet (Bild I). Diese Modelle berücksichtigen die reale Geometrie der Kontaktpartner sowie das plastische Werkstoffverhalten. Mit den FE-Berechnungen wurde der Einfluss der Konstruktion der Armatur auf die Kraftwirkung in der Verbindung untersucht [1].

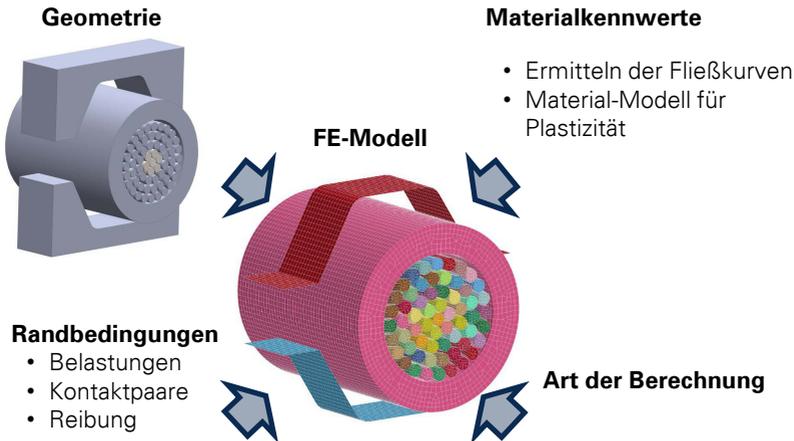


Bild I: Vorgaben im FE-Modell für das Nachbilden des Fügens einer Pressverbindung

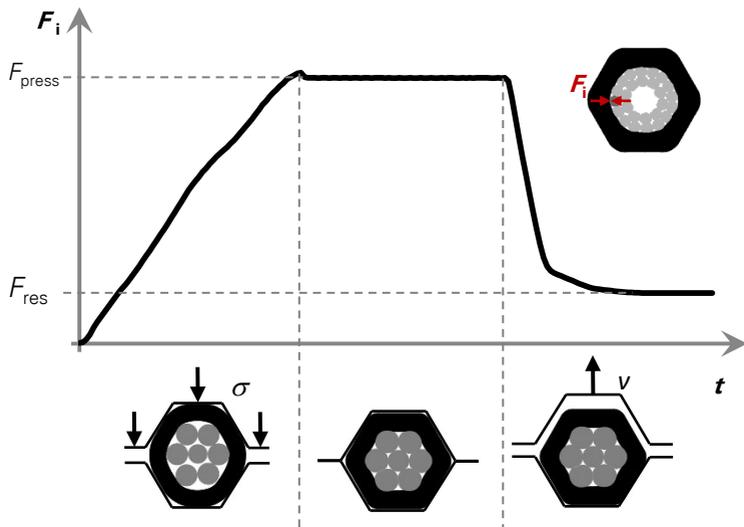


Bild II: Verlauf der Kraft an einer Kontaktfläche während des Fügeprozesses einer Pressverbindung

Aus dem Fügeprozess ergibt sich der Verlauf der Kraft für eine beliebige Kontaktfläche in der Verbindung (Bild II). Für jede Kontaktfläche wurde auf diesem Weg die Press- und die Kontaktkraft ermittelt und anschließend systematisch für die Kontaktflächen zwischen der Armatur und dem Leiter bzw. für die Kontaktflächen innerhalb des Leiters ausgewertet. Dabei wurde festgestellt, dass die Press- und die Kontaktkraft in der Verbindung abhängig von der Konstruktion der Armatur sind. Eine höhere Presskraft wird erreicht, wenn z. B. ein größeres Aluminiumvolumen auf das gleiche Zielvolumen verdichtet wird. Gleichzeitig führt die höhere Presskraft zum Kaltverfestigen des Leitermaterials. Folglich ist der Umformgrad des Leiterwerkstoffs höher und die Kontaktkraft erhöht sich aufgrund der verbesserten elastischen Rückfederung. Weiterhin werden aus dem prinzipiellen Kraftverlauf wesentliche Mechanismen des Kontaktverhaltens von Pressverbindungen deutlich. Es konnte nachgewiesen werden, dass der von anderen Verbindungssystemen bekannte Zusammenhang zwischen Kontaktwiderstand und Press- bzw. Kontaktkraft auch bei Pressverbindungen gilt. Das heißt, neben dem Formschluss ist ein Kraftschluss in der Verbindung notwendig, um ein gutes Kontakt- und Langzeitverhalten zu erreichen.

[1] Hildmann, C.; et. al.: *Einfluss von Kraft- und Formschlussanteil auf das elektrische Kontaktverhalten von Pressverbindungen*. 23. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 2015.



Christian Kühnel, Dipl.-Ing.

### Untersuchungen zur Grenztemperatur von NH-Sicherungseinsätzen bei erhöhter thermischer Beanspruchung

Neue Anforderungen an moderne Energieversorgungsnetze, vor allem im Rahmen der zunehmenden Einspeisung regenerativer Energien, führen auch zu einem sich wandelnden Belastungsprofil für NH-Sicherungen. Durch eine zunehmende Sekundäreinspeisung in Niederspannungsnetzen werden Verteilstationen zu Einspeisestationen mit gleichzeitig anhaltend hoher Strombelastung mehrerer Stromkreise. Kostendruck und ein steigendes Sicherheitsbedürfnis führen zudem zu immer kompakteren und stärker gekapselten Anlagen. Eine stetig steigende thermische Beanspruchung der gesamten Sicherung ist die Folge. Dabei spielt vor allem der temperaturabhängige Prozess der Interdiffusion zwischen dem Schmelzleiter und dem Lotauftrag eine wichtige Rolle, der für ein erfolgreiches Schalten von Überlasten unerlässlich ist. Bei sehr hoher thermischer Beanspruchung führt die Interdiffusion zu einer beschleunigten Alterung des Schmelzleiters bereits im Normalbetrieb und kann zu Fehlschaltungen und Schaltversagen führen. Die maximale Schmelzleitertemperatur ist daher das maßgebliche Kriterium für einen zuverlässigen Betrieb von Sicherungen. Jedoch fehlen in der Praxis bisher belastbare Kriterien wie Grenztemperaturen, die zu keiner beschleunigten Alterung der Schmelzleiter führen und einen zuverlässigen Betrieb der Sicherungen in der Einbausituation sicherstellen.

In experimentellen Untersuchungen wird deshalb das Langzeitverhalten von Schmelzleitern bei unterschiedlichen Temperaturen untersucht, mit dem Ziel, materialabhängige Grenztemperaturen für Schmelzleiter herzuleiten, die einen langzeitstabilen Betrieb von Sicherungen auch unter erschwerten Einsatzbedingungen gewährleisten [1].

Typ	Eigenschaften Schmelzleiter			Kenngrößen Sicherungseinsätze
			$\vartheta_s$ Lot in °C	
<b>A</b>	Cu	SnBiCu	165-215	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Betriebsklasse gG</li> <li>• Baugröße NH 2</li> <li>• <math>I_r = 250</math> A</li> <li>• <math>U_r = 500</math> V (AC)</li> <li>• Schmelzleiter: 2 - 3</li> </ul>
<b>B</b>	Cu	SnAg	221	
<b>C</b>	Cu	SnCu	227	
<b>D</b>	Cu	SnCu	227	

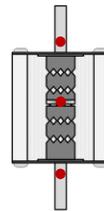


Bild 1: untersuchte Sicherungseinsätze (li) und Temperaturmessstellen (re)

Da die Temperatur der Schmelzleiterin praktischen Prüfungen nicht gemessen werden kann, muss der Zustand des Schmelzleiters alternativ z. B. über die Temperatur des Sicherungsmessers beurteilt werden. Dafür muss der Tem-

peraturgradient zwischen dem Sicherungsmesser und dem Schmelzleiter bekannt sein. Dieser ist stark von den Umgebungsbedingungen abhängig.

In experimentellen Untersuchungen wird deshalb weiterhin das thermische Verhalten von Sicherungseinsätzen, mit den gleichen Schmelzleiter aus den Langzeitversuchen, abhängig von der Strombelastung und zunächst frei in Luft untersucht. Alle Sicherungseinsätze besitzen dabei die gleichen Bemessungswerte, unterscheiden sich jedoch voneinander in Geometrie und Anzahl der Schmelzleiter sowie der verwendeten Lotwerkstoffe (Bild I). Es wurde die Temperaturverteilung und insbesondere der Temperaturgradient an Sicherungseinsätzen gemessen, die dafür mit Thermoelementen an den Schmelzleitern und Sicherungsmessern präpariert waren (Bild I re.).

Bei gleichen Bemessungswerten zeigen die Sicherungseinsätze eine ähnliche Erwärmung der Sicherungsmesser (Bild II li.). Dennoch wurden sehr unterschiedliche Temperaturgradienten (Bild II re.) und damit eine stark variierende maximale Temperatur des Schmelzleiters gemessen. Dabei korreliert diese maximale Temperatur nicht zwangsläufig mit der Schmelztemperatur der jeweiligen Lotwerkstoffe (vgl. Bild I li.), wodurch sich unterschiedliche Differenzen zur Schmelztemperatur des jeweiligen Lotes ergeben. Erfolgt der Einsatz bei erhöhten Umgebungstemperaturen, zeigen die Ergebnisse trotz gleicher Bemessungswerte der Sicherungseinsätze, dass diese sich für eine erhöhte thermische Beanspruchung unterschiedlich eignen bzw. robust sind.

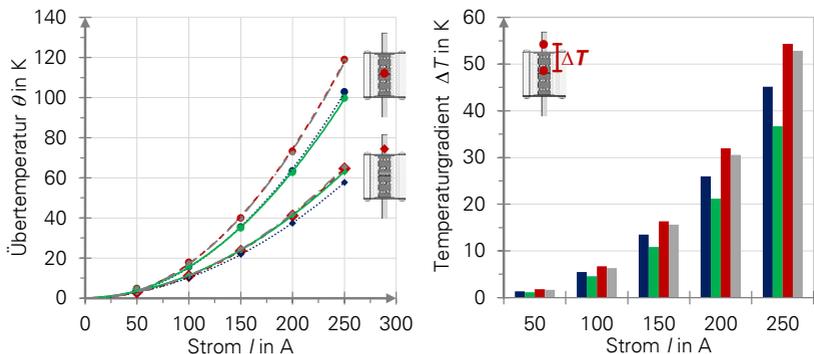


Bild II: Temperaturverteilung und Temperaturgradient frei in Luft

In fortführenden Untersuchungen sollen diese ersten Ergebnisse präzisiert und für abweichende Einbaubedingungen erweitert werden. Ziel ist es, verallgemeinerte Aussagen zum Temperaturgradienten der untersuchten Sicherungseinsätze abhängig von den unterschiedlich vorherrschenden Betriebsbedingungen treffen zu können.

[1] Kühnel, C.: *The influence of important ageing mechanisms on long-term behavior and reliability of fuse-links at higher temperatures*. ICEFA, Dresden, 2015



Nils Lücke, Dr.-Ing.

### **Erhöhen der Übertragungsleistung von bestehenden Hochspannungs-Freileitungen durch den Einsatz von Hochtemperatur-Freileitungsseilen**

Durch den Ausbau der regenerativen Energieerzeugung in Deutschland und Europa werden die zu übertragenden Leistungen von den Erzeugungs- in die Verbraucherzentren immer größer. Da die Genehmigungsverfahren für neue Energieübertragungstrassen oft sehr zeit- und kostenintensiv sind, wird zunehmend versucht, durch das Aufrüsten bestehender Trassen die Übertragungsleistung zu erhöhen (NOVA-Prinzip). Im Rahmen eines europäischen Verbundprojekts (BEST PATHS\*) sollen prinzipielle Methoden entwickelt werden, die Übertragungsleistung bestehender AC-Freileitungstrassen zu erhöhen. Ein möglicher Ansatz besteht darin, Hochtemperatur-Freileitungsseile einzusetzen, um höhere Ströme bei gleichem maximalem Seildurchhang sowie mechanischer Belastung der Stützpunkte zu erreichen.

Die Professur für Hochspannungs- und Hochstromtechnik und insbesondere der Forschungsbereich Elektrische Kontakte und Verbindungen untersucht die Teilaufgabe des Langzeitverhaltens der elektrischen Verbindungen für HTLS-Freileitungsseile (HTLS ... High Temperature Low Sag). In direkter Kooperation mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin sowie der 50Hertz Transmission GmbH als Teilprojekt-Koordinator wurde bereits ein Konzept für einen kombinierten mechanischen und elektrisch-thermischen Alterungsversuch entwickelt. Dieses Konzept sieht vor, die zu untersuchenden Seiltypen einschließlich der montierten Pressabspannklemmen und Pressverbinder mit einer wechselnden mechanischen Zugkraft zu belasten, die insbesondere ein zu erwartendes Windregime über einen Zeitraum von 50 Jahren abbilden soll. Zusätzlich werden die Leiterseile über einen Zeitraum von einem halben Jahr mit einem elektrischen Strom belastet, bei dem die seilspezifische Bemessungstemperatur erreicht wird. Um die Alterung der elektrischen Verbindungen beurteilen zu können, werden während der Alterungsversuche die Temperaturen an den Verbindungen und den unbeflussten Leiterseilen sowie die Verbindungswiderstände gemessen.

In dem geplanten Alterungsversuch können vier HTLS-Technologien zeitgleich unter mechanischer und elektrisch-thermischer Belastung untersucht werden (Bild I). Innerhalb der Projektlaufzeit können so insgesamt acht verschiedene Seiltypen für jeweils einen Zeitraum von einem halben Jahr entsprechend des festgelegten Lastprofils gealtert werden. Der Versuchsaufbau wird in einem Nebengebäude des Umspannwerks Ragow (50Hertz Transmis-

\*BEST PATHS steht für „BEyond State-of-the-art Technologies for rePowering Ac corridors and multi-Terminal HvdC-Systems“. Das Projekt wird gefördert von der Europäischen Kommission innerhalb des Seventh Framework Programme for Research, Technological Development and Demonstration mit dem Grant Agreement Nr. 612748

sion GmbH) realisiert und hat eine Gesamtlänge von 26 m. Die im Alterungsversuch belasteten Leiterseile und Verbindungen werden anschließend verschiedenen mechanischen Prüfungen bei der BAM unterzogen und mit den Ergebnissen vergleichbarer Untersuchungen im Neuzustand verglichen. Ein Teil dieser mechanischen Prüfungen wird in Kombination mit Messungen elektrischer Widerstände erfolgen. Ziel ist es, die verschiedenen HTLS-Technologien miteinander zu vergleichen und Rückschlüsse für die praktische Anwendbarkeit zu ziehen.

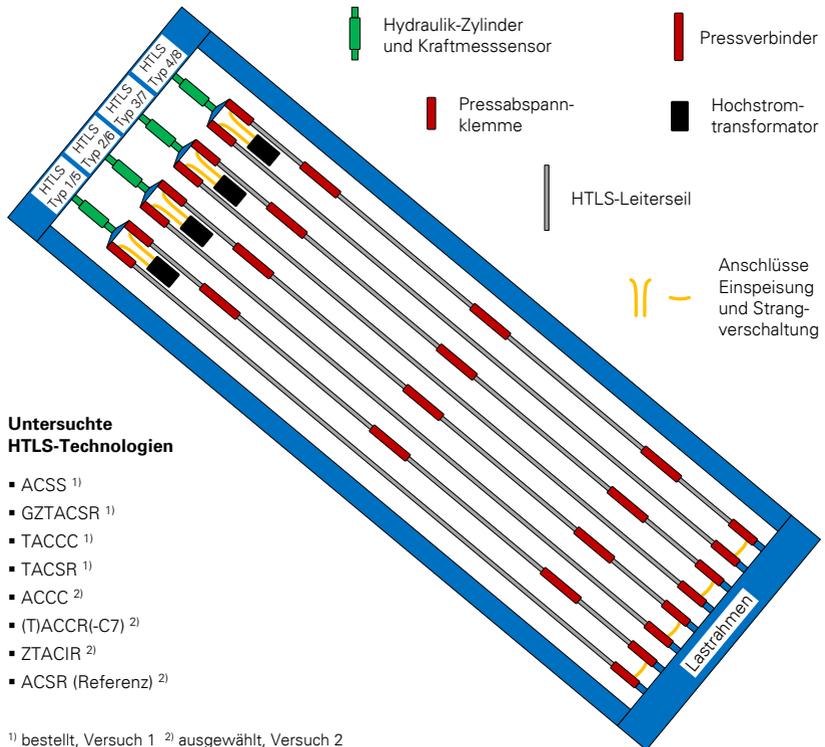


Bild I: Schematischer Versuchsaufbau für kombinierte mechanische und elektrisch-thermische Untersuchungen an HTLS-Leiterseilen und -Verbindungen sowie untersuchte HTLS-Technologien



Stephanie Pfeifer, Dr.-Ing.

### Einfluss der Sauerstoffdiffusion auf die Alterung stromtragender Verbindungen mit beschichteten Kontaktpartnern

Durch die Alterung stromtragender Verbindungen wird der Verbindungswiderstand abhängig von der Zeit kontinuierlich größer. Für das System Aluminium-Silber wurde in Grundlagenversuchen zum Einfluss intermetallischer Phasen auf den Verbindungswiderstand festgestellt, dass Silberschichten auf Aluminiumleitern für Sauerstoff durchlässig sind [1]. Dieser Effekt kann auch bei silberbeschichteten Kupferleitern auftreten [2]. Durch das Anreichern von Sauerstoff in der Silberschicht steigt die Wahrscheinlichkeit, dass die Grundmaterialien unter der Beschichtung oxidieren. Es werden neben Silberschichten auch andere Beschichtungen wie z. B. Zinn oder Nickel, sowie Varianten mit Zwischenschichten untersucht. Ziel ist es, die Sauerstoffdiffusion als möglichen Alterungsmechanismus besser zu verstehen. Dazu wurden in einem ersten Schritt verschiedene Schichtsysteme auf Aluminium- und Kupferbleche galvanisch abgeschieden. Das Herstellen der Beschichtungen erfolgte beim Projektpartner „fem – Forschungsinstitut Edelmetalle + Metallchemie“ in Schwäbisch Gmünd. Die Blechproben wurden im Wärmeschrank an normaler Luft bei 115 °C und 200 °C gelagert. Bereits nach wenigen hundert Stunden konnten optische Veränderungen an den Oberflächen der Beschichtungen (Anlaufen) festgestellt werden (Bild I).

Versilbertes Al-Blech:

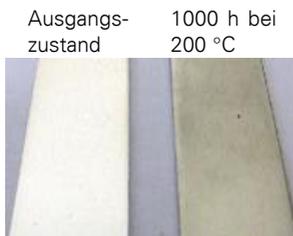


Bild I: Anlaufen der Oberfläche versilberter Al-Bleche bei 200 °C in Luft

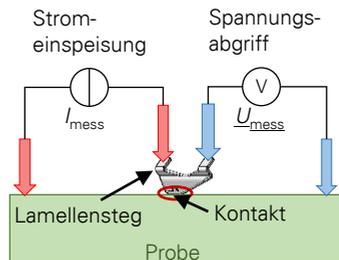


Bild II: Prinzip der Messung durch Kontaktierung mit einem Lamellensteg

An den Proben wurde mit einer speziellen Messeinrichtung abhängig von der Zeit der Kontaktwiderstand\* gemessen, um den Einfluss der Veränderungen an der Oberfläche zu bestimmen (Bild II).

Veränderte Kontaktwiderstände können einen Hinweis auf Fremd- bzw. Oxidschichten, oder Veränderungen in der Beschichtung selbst geben. Bild III zeigt die auf den Anfangswiderstand bezogenen Kontaktwiderstände der verschiedenen Beschichtungssysteme nach ca. 1000 h bei 200 °C im Vergleich zum Ausgangszustand. Es konnte festgestellt werden, dass der Kontaktwiderstand bei allen Beschichtungssystemen ansteigt. Am stärksten erfolgte dies an vernickelten Proben. Bei Proben mit Ni-Zwischenschicht und Ag-Deckschicht steigt der Kontaktwiderstand nur leicht an. In einem nächsten Schritt werden die gealterten Proben mikroskopisch untersucht, um Hinweise auf die Ursachen dieser Veränderungen zu erhalten. Für Systeme, in denen Sauerstoff in die Beschichtung eindringt, sollen im Anschluss Langzeitversuche durchgeführt werden.

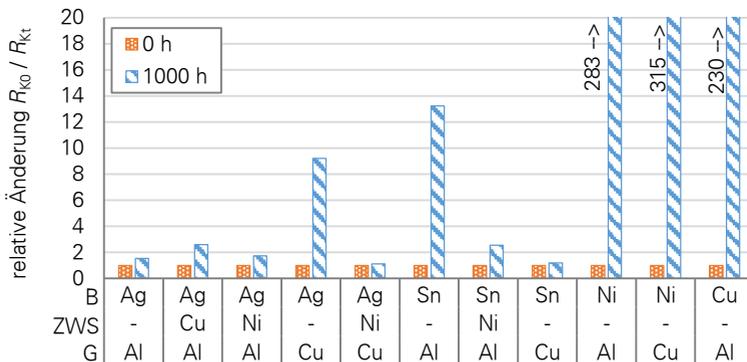
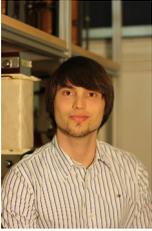


Bild III: Bezogener Kontaktwiderstand  $R_{K(t>0)}/R_{K(t=0)}$  für verschiedene Schichtsysteme (G: Grundmaterial, ZWS: Zwischenschicht, B: Beschichtung) im Ausgangszustand und nach 1000 h bei 200 °C im Wärmeschrank

- [1] Pfeifer, S. et. al: *Characterization of Intermetallic Compounds in Al-Ag Bimetallic Interfaces*. International Conference on Electrical Contacts 2014, Dresden
- [2] Fuhrmann, T. et. al.: *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*. Holm Conference on Electrical Contacts , New Orleans

\*Der Materialwiderstand des verwendeten Lamellensteiges geht in die Messung ein. Dieser ändert sich nicht, d. h. Änderungen in den Messwerten resultieren direkt aus der Änderung des Kontaktwiderstandes



Alexander Ramonat, Dipl.-Ing.

### Technologie zum langzeitstabilen Verbinden von zylindrischen Leitern aus Aluminium

Zylindrische Leiter aus Aluminium mit großen Außen- und Innendurchmessern ( $> 100 \text{ mm}$ ) werden häufig im Bereich gasisolierter Schaltanlagen (GIS) und Leitungen (GIL) eingesetzt. Für den Stromtransport werden i. d. R. Leiterrohre genutzt. Um die Leiterrohre mit anderen Komponenten, wie z. B. Leistungsschaltern zu verbinden, werden Adapter in Form von Vollzylindern, sogenannte Inlets, eingesetzt. Beide Bauteile werden in der Praxis häufig mit federnden Kontaktelementen verbunden, um Relativbewegungen (thermische Dehnung) zwischen den Leitern und der Kapselung auszugleichen. Um kleine Verbindungswiderstände im Ausgangszustand und ein gutes Langzeitverhalten beim Einsatz von Kontaktelementen sicherzustellen, müssen die Kontaktflächen von Leiterrohr und Inlet beschichtet werden. Das Beschichten der Kontaktflächen ist zeitaufwändig und, ähnlich wie die Kontaktelemente, teuer. Bei kurzen Leiterabschnitten sind die thermischen Dehnungen klein, sodass auch nicht lösbare Verbindungen eingesetzt werden können. Auch bei langen Leiterabschnitten ist der Einsatz von nicht lösbaren Verbindungen auf einer Seite des Leiterrohres denkbar. Hierfür sollen neue Verbindungstechnologien eingesetzt werden, die kostengünstig sind und einen, im Vergleich zu Steckverbindungen, deutlich geringeren Verbindungswiderstand haben und damit kleinere Verlustleistungen an den Verbindungen erzeugen. Untersucht werden das Längs- und Querpressen, die Elektromagnetische Pulstechnologie (EMPT) sowie das Umformen durch Walzen. An dieser Stelle werden zunächst nur das Längs- und Querpressen vorgestellt. Bei beiden Technologien ist der Durchmesser  $d_i$  des Inlets (Bild I) größer als der Innendurchmesser des Leiterrohres  $d_{Ri}$ , wodurch sich ein positives Übermaß ergibt.

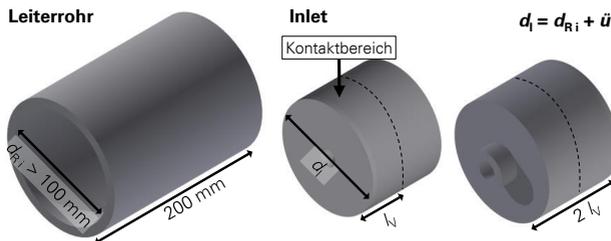


Bild I: Geometrie von Leiterrohr und Inlet für das Längs- und Querpressen

Die elektrische Verbindung entsteht entweder durch das Einpressen des Inlets (Längspressen) oder durch das Abkühlen, Einsetzen und anschließendes

Ausdehnen des Inlets (Querpressen). Leiterrohr und Inlet sind aus einer Aluminiumlegierung gefertigt und es wurde als wesentlicher Einflussparameter das Übermaß variiert, da dadurch der Kraftschlussanteil sowie der Grad der Verformung in der Verbindung beeinflusst wird. Anschließend wurden für diese Technologien die Verbindungswiderstände im Ausgangszustand ermittelt und bewertet (Bild II). Hierbei ist der von anderen Flächenkontakten, wie Schraubenverbindungen mit Stromschiene, bekannte Zusammenhang zwischen Kraft und Verbindungswiderstand zu erkennen. Aufgrund der großen Relativbewegung zwischen den Verbindungspartnern beim Längspressen ist der Einfluss des Übermaßes auf den Verbindungswiderstand weniger stark ausgeprägt als beim Querpressen.

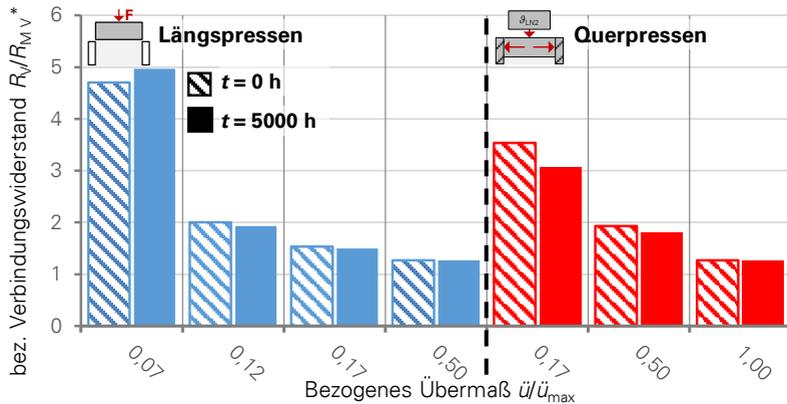


Bild II: Ergebnisse der Versuche im Wärmeschrank [1]

Um das Langzeitverhalten der Verbindungen bewerten zu können, werden die Proben derzeit in einem Wärmeschrank bei einer Temperatur von 105 °C gelagert. Dabei wird zyklisch der Verbindungswiderstand gemessen. Nach einer Zeit von 5000 h wurden beim Längs- und Querpressen für alle untersuchten Übermaße keine signifikanten Änderungen der Verbindungswiderstände beobachtet (Bild II). Des Weiteren wird aktuell ein Versuchsstand aufgebaut, um das Langzeitverhalten von längs und quergepressten sowie über EMPT hergestellten Verbindungen bei kontinuierlicher AC-Strombelastung zu untersuchen. Dabei werden kritische Parameter, wie die kleinsten Übermaße als auch technisch relevante Parameter untersucht. Zusätzlich werden in den Versuchen silberbeschichtete Inlets beim Längs- und Querpressen betrachtet.

- [1] Ramonat, A.; Schlegel, S.; Großmann, S.; Kudoke, M.: *Basic Investigations on Joints with Cylindrical Aluminum Conductors Made by Press- and Shrink-fit for High-current Devices*. 61st IEEE Holm Conference, San Diego, 2015

\* $R_{M_V}$  – Mit FE-Berechnungen bestimmter Materialwiderstand der Verbindung bei idealer Kontaktierung



Stephan Schlegel, Dr.-Ing.

### Normenkonzept zur Bewertung der Lebensdauer stromtragender Verbindungen in der Elektroenergie-technik

Die elektrische Prüfung von stromtragenden, ruhenden Verbindungen wird in zahlreichen Standards beschrieben. Je nach Anforderungen im praktischen Betrieb und dem Einsatzgebiet sind Prüfverfahren definiert, in denen häufig bei zyklischer thermischer Belastung die prinzipielle Funktionalität der Verbindung nachgewiesen werden soll. Die einzelnen Standards unterscheiden sich dabei zum Teil erheblich. Rein wissenschaftlich betrachtet, ist die Stromtragfähigkeit und das Kontakt- sowie Langzeitverhalten einer Verbindung unabhängig von der Spannungsebene und sollte unter Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften des Verbindungssystems gleich betrachtet werden können [1]. Um zunächst einen Überblick über die einzelnen Prüfverfahren zu erhalten, wurden 25 Standards aus dem amerikanischen, russischen und europäischen Raum ausgewertet und miteinander verglichen (Auszug s. Tabelle I).

Tabelle I: Ausgewählte elektrische Prüfungen gemäß Standards [1]

Norm	DIN EN 61284: 1998	DIN EN 61238-1: 2004	DIN EN 60999: 2000
Anzahl Prüflinge	4	6	10
Anzahl Zyklen $n$	$1000^1/500^2/100^3$ zusätzlich $I_k$	1000 zusätzlich $I_k$	196
$\Delta\vartheta$ oder $\vartheta$ (teilw. VL)	$70\text{ K}^1/100\text{ K}^2/130\text{ K}^3$ < $180^\circ\text{C}$ (Kurzzeit)	( $120 \dots 140$ ) $^\circ\text{C}$ ( $< 250 \dots 270$ ) $^\circ\text{C}$ (Kurzzeit)	Wärmeschrank mit Prüfstrom oder nach Produktnorm
$\vartheta_u$ in $^\circ\text{C}$	15...30	15...30	20...40 Wärmeschrank
Plateau-phase	30 min. (VL)	10 min. Medianverbinder	thermisch stabil 10 min., $\Delta\vartheta \leq 5\text{ K}$
Messung	DC, max. 10 % $I_p$	DC, max. 10 % $I_p$	DC oder AC $I_p$
Kriterien für den Widerstand	$R_{V0}$ (30 % Str.) $R_{V<0,1-n} < 0,75 \cdot R_{L,VL}$ $R_{V>0,5-n} < 1,5 \cdot R_{V0}$	$k_{u0}$ (30 % Str.) $k_{u,1000} < 2 \cdot k_{u0}$	Spannungsfall bei $I_p < 22,5\text{ mV}$ oder $1,5 \cdot R_{V,n=24}$

$I_k$  ... Kurzzeitstrom,  $R_V$  ... Verbindungswiderstand,  $R_L$  ... Leiterwiderstand,  $k_u$  ... Gütefaktor,  $I_p$  ... Prüfstrom,  $n$  ... Anzahl Zyklen, VL ... Vergleichsleiter

Dabei wurde deutlich, dass sich die Prüfverfahren hinsichtlich der Prüfbedingungen, dem Prüfablauf, den Messverfahren und den Auswertekriterien zum Teil erheblich unterscheiden. Deshalb wurden die Prüfverfahren harmonisiert und mit wissenschaftlichen Erkenntnissen aus den letzten 35 Jahren For-

schung überarbeitet und ergänzt. Anschließend wurden die Ergebnisse in einem neuen Prüfverfahren zusammengefasst, das sowohl Teile bereits vorhandener genormter Inhalte aber auch wesentliche Erkenntnisse aus experimentellen Versuchen berücksichtigt. Es konnte ein allgemeingültiges Prüfverfahren beschrieben werden, das spezifische Aspekte unterschiedlicher Verbindungssysteme berücksichtigt und neben dem Nachweis der elektrischen Funktionalität erste Aussagen zur Langzeitstabilität zulässt (Bild I).

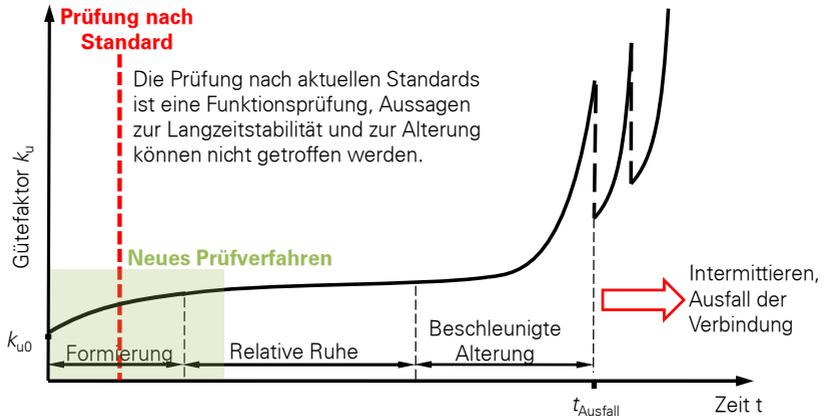


Bild I: Prüfverfahren nach aktuellen Standards im Vergleich zum neuen Prüfverfahren über der Lebensdauererkennlinie stromtragender Verbindungen

Das erarbeitete Prüfverfahren wird derzeit an einem ausgewählten Verbindungssystem überprüft und mit den Ergebnissen des gültigen konventionellen Prüfverfahrens verglichen. Ziel ist es, die Anwendbarkeit zu überprüfen und anhand der Resultate die Wirksamkeit zu kontrollieren. Die Ergebnisse dieser Prüfung werden genutzt, um das Prüfverfahren gegebenenfalls anzupassen oder zu ergänzen. Das Kooperationsprojekt mit dem Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie und dem Projektträger „Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.“ gefördert sowie durch assoziierte Partner aus der Industrie unterstützt, die beratend den Entwicklungsprozess begleiten. Ziel des Projekts ist es, eine Richtlinie oder DIN SPEC zu erarbeiten, die zunächst in nationalen Arbeitskreisen verteilt werden soll.

[1] Hildmann, C. et al.: *Vergleich genormter elektrischer Alterungsprüfungen für Verbindungen der Elektroenergietechnik mit Erkenntnissen aktueller wissenschaftlicher Untersuchungen*. Connectors Symposium, Lemgo, 2015

## Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Hochspannungstechnik“



Karsten Backhaus, Dipl.-Ing.

**Dielektrische Leitfähigkeit und Durchschlagverhalten der Öl-Papier-Isolierung bei Gleichspannungsbelastung**

Die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) ist die Technologie der Wahl zum Transport elektrischer Energie über große Distanzen aufgrund des Wegfalls kapazitiver und induktiver Blindleistungsanteile gegenüber der Hochspannungswechselstromübertragung. Die elektrische Feldbeanspruchung der Isolierung der elektrischen Betriebsmittel resultiert bei Gleichspannungsbelastung aus dem Leitfähigkeitsverhalten der eingesetzten Isolierwerkstoffe.

Für das Leitfähigkeitsverhalten von Isolierwerkstoffen wurden bisher die Gültigkeit des Ohm'schen Gesetzes und ein lineares, isotropes Dielektrikum angenommen. Daraus leitet sich die Differentialgleichung (1) ab, auf welcher ein Großteil der kommerziellen Feldberechnungsprogramme basiert.

$$0 = \nabla \cdot \left( \kappa \mathbf{E} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) \quad (1)$$

Deren Ergebnisse zur Potentialverteilung sind linear abhängig von den äußeren Spannungsrandbedingungen. Hingegen wären die Zeitkonstanten der Polarisationsprozesse, welche sich aus dem  $\kappa$ - $\varepsilon$ -Verhältnis ergeben, unabhängig von der Spannung.

Für die Öl-Papier-Isolierung, wie sie vorzugsweise in HGÜ-Leistungstransformatoren eingesetzt wird, treffen diese Aussagen nicht zu. So weist das Strom-Zeit-Verhalten bei Gleichspannungsbelastung bzw. bei deren Polaritätswechsel verschiedene Nichtlinearitäten auf. Zudem ergeben sich Widersprüche zwischen Durchschlagspannungen und mit Hilfe obiger Gleichung berechneten Höchstfeldstärken. Innerhalb von [1] konnte ausführlich aufgezeigt werden, dass das dielektrische Verhalten der Isolierwerkstoffe bei Gleichspannungsbelastung signifikant durch vorhandene Raumladungen bestimmt wird. Sowohl das Strom-Zeit- als auch das Durchschlagverhalten werden dabei maßgeblich beeinflusst. Leitfähigkeit ist damit nicht mehr als integrale unabhängige Größe zu verstehen, wie es die spezifische Leitfähigkeit  $\kappa$  als eine Größe suggeriert, sondern aus dem Zusammenspiel differenzieller bzw. lokaler feldstärkeabhängiger Teilprozesse – Bild 1.

Auf Basis der Konzentration der im Dielektrikum befindlichen Ladungsträger kann die Potentialverteilung mit Hilfe der Poisson-Gleichung beschrieben werden.

$$-\Delta\varphi = \frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} = \frac{e}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \sum_i z_i n_i \quad (2)$$



Bild 1: Ladungsträgerbasierte Leitfähigkeitsmechanismen im Dielektrikum

Die Ladungsträger können sich dabei angetrieben durch elektrostatische Feldkräfte oder aufgrund eines Diffusionsantriebs frei im elektrischen Feld bewegen. Diese Bewegung einer Ladungsträgerspezies beschreibt die Nernst-Planck-Gleichung.

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} - \mu_i n_i \Delta \varphi - D_i \Delta n_i = r_{i \text{ Dissoziation}}(E) - \sum_j r_{ij \text{ Rekombination}} \cdot n_i n_j \quad (3)$$

Mit Hilfe dieses Differentialgleichungssystems konnten in der vergangenen Jahren viele zu beobachtende Effekte identifiziert und qualitativ berechnet werden. Der Gegenstand der aktuellen Forschungsarbeit besteht in der quantitativen Bestimmung der Gleichungsparameter. So werden beispielsweise die polaritätsabhängigen Ladungsträgerinjektionsprozesse an den Elektroden durch gezielte Strommessungen bestimmt. Ein Nachweis der qualitativen Unterschiede der Feldstärkeverteilung in Barriereanordnungen zwischen planparallelen Elektroden gegenüber der bisherigen Modelle soll mit Hilfe von Durchschlagexperimenten erbracht werden.

[1] J. Speck, M. Hering, K. Backhaus, I. Ovsyanko *Discharge Behaviour under DC Stress and its Consequences on High Voltage Tests*. Highvolt-Kolloquium, Radebeul, 2014.



Maria Hering, Dipl.-Ing.

## Überschlagsverhalten von Isolatoren in gasisolierten Gleichspannungssystemen

Erfahrungen im Umgang mit gasisolierten Schaltanlagen und Leitungen bei Wechselspannung bestehen seit den 1960er-Jahren. Mittlerweile sind diese Systeme weltweit in allen Spannungsebenen von 72,5 kV bis 1200 kV Stand der Technik. Die Übertragung immer größerer Leistungen über weite Entfernungen erfolgt jedoch mit hoher Gleichspannung. Der gleichzeitige Bedarf an platzsparenden Anlagen erfordert damit kompakte, gasisolierte Systeme im Gleichspannungsbetrieb. Um gasisolierte Systeme für die Hochspannungsgleichstromübertragung einsetzen zu können, müssen die bei Wechselspannung bewährten Dimensionierungsrichtlinien angepasst werden.

Im Vergleich zu Wechselspannungsanwendungen wird das Gleichspannungsfeld von dem 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 ( $\epsilon$ -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.

Die experimentellen Ergebnisse bestätigen, dass sich der Ort der Höchstfeldstärke in kältere Bereiche verschiebt. Da sich im Vergleich zum AC-Feld eine absolut höhere Feldstärke einstellt, ist das Isoliervermögen der Anordnung unter Gleichspannungsbedingungen um (10 ... 15) % herabgesetzt (Bild II).

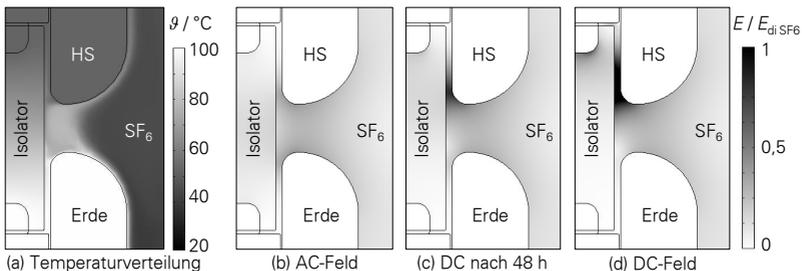


Bild I: Berechnung des Übergangs vom elektrostatischen Feld (b) zum stationären Strömungsfeld (d) bei erwärmter Erdelektrode und inhomogener Temperaturverteilung im Gasraum und entlang des Isolators (a)

Beeinflusst wird der kapazitiv-resistive Übergang von zusätzlich generierten Ladungsträgern, z. B. durch Teilentladungen (TE) an Störstellen. Diese typischerweise metallischen Partikel sind trotz hoher Qualitätsstandards bei Fertigung und Montage nicht völlig auszuschließen, sodass deren Verhalten und deren Einfluss auf das Isoliervermögen bekannt sein muss.

Es zeigt sich, dass feste Metallpartikel auf Isolatoroberflächen das Isoliervermögen der Anlage negativ beeinflussen [1]. Da die Teilentladungen bereits weit unterhalb der Durchschlagsspannung der ungestörten Anordnung auftreten [2], können kontinuierlich Ladungsträger generiert werden, die sich im elektrischen Feld bewegen und auf dielektrischen Grenzflächen als Oberflächenladungen anlagern. Dadurch wird der kapazitiv-resistive Übergang erheblich beschleunigt (Bild II). Ohne Partikel und damit ohne zusätzliche Ladungsträger ist erst nach 48-stündiger Gleichspannungsbelastung eine Absenkung der Überschlagespannung zu beobachten. Produzieren Teilentladungen an einem Partikel Ladungsträger, so ist die Feldumbildung schon nach sechs Stunden abgeschlossen. Die Minderung des Isoliervermögens beträgt ebenfalls (10 ... 15) %, sodass davon ausgegangen werden kann, dass der absolute Wert der Höchstfeldstärke unbeeinflusst bleibt. Das polaritätsabhängige Verhalten ist auf die unterschiedliche Ausprägung der positiven und negativen Teilentladungen am unsymmetrisch angeordneten Partikel zurückzuführen [3].

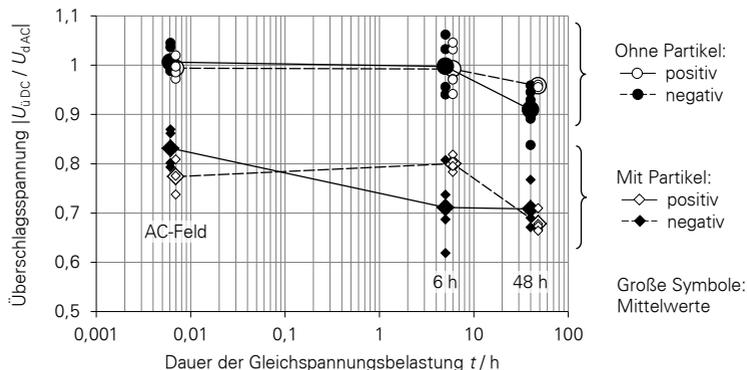


Bild II: Überschlagespannung abhängig von der Dauer der Gleichspannungsbelastung bezogen auf den Wert bei Wechselspannungsbedingungen

- [1] M. Hering, J. Speck, S. Großmann, U. Riechert, *Investigation of Particles on Insulator Surfaces in Gas Insulated Systems under DC Stress*. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Des Moines 2014.
- [2] M. Hering, J. Speck, S. Großmann, U. Riechert, S. Neuhold, *Detection of particles on the insulator surface in gas insulated DC systems*. Highvolt-Kolloquium, Dresden 2015.
- [3] M. Hering, J. Speck, K. Backhaus, S. Großmann, U. Riechert, *Capacitive-resistive transition in gas insulated DC systems under the influence of particles on the insulator surface*. 19<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen 2015.



Davoud Esmail Moghadam, M.Sc.

### Interturn Insulation Quality Assessment, Considering the Standards State

The usage of drive fed induction motors due to numerous and considerable industrial benefits of this kind of electrical machines is obviously increasing. According to recent publications interturn insulation deterioration due to non-uniform voltage distribution constitutes one of the main reason of stator insulation failures. This issue could be potentially considered as a source of unscheduled shutdowns in the industries and consequently big financial losses.

In order to assess the suitability and condition of interturn insulation, test methods have been suggested in standard IEC/TS 60034-18-42:2008 (or DIN EN 600034-18-42 draft in April 2013). However, this publication is too general and there is no specific data for implementation of the test. For instance it is possible that the same test with the same material has been done by two different testing laboratories, by the time the achieved results are different.

In this research, in accordance with the IEC/TS 60034-18-42:2008 (or DIN EN 600034-18-42 draft in April 2013), interturn insulation for samples with different copper strand thickness and length have been prepared and performed by measuring the partial discharge inception voltage (PDIV).

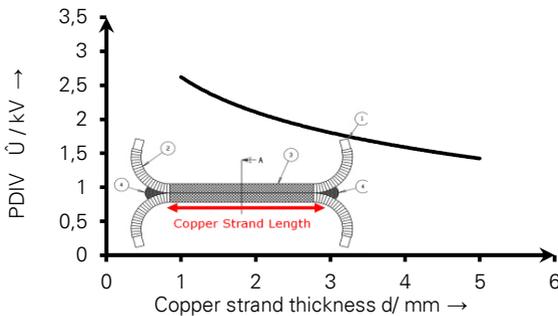


Figure I: The copper strand thickness Effects on the PDIV level

The achieved results shown in the Fig. I and Fig. II demonstrate a strong dependency between partial discharge inception voltage and copper strand thickness and length. This means, by increasing the copper strand thickness or length in the test samples, the PDIV decreases significantly. It could be due to the spring effect of the copper strands which intensify meanwhile the heating process.

On the other hand, the suggested test sample in the IEC/TS 60034-18-42, is not able to consider practical conditions which the turn insulations experience

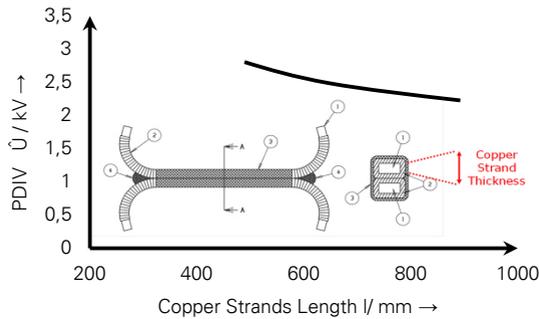


Figure II: The copper strand length Effects on the PDIV level

in operational situation such as curve sections or overhang area. Additionally, the proposed sample demonstrated dependency to the length and the copper thickness. Hence it has been tried to use and introduce another test sample which consider all practical condition of the turn insulation.

After accurate investigations and analysis on the various condition and stresses of the turn insulation, completed coil has been selected and partial discharge inception voltage measurement has been done on the completed coil samples. The dependency of the PDIV for the completed coil sample to the copper length has been considered and the obtained results approve independency of the partial discharge inception voltage to the copper strand thickness and length.

Finally, to assess and compare the condition and suitability of a insulation system and in order to eliminate the effect of the copper conductor thickness and length, it seems that the complete coil samples, with all real regions of a complete coil, should be used instead of the proposed test sample in IEC 60034-18-42 to investigate partial discharge and life time of the turn insulation.



**Matthias Voigt, Dipl.-Ing.**

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

Im Rahmen eines BMWi-Projekts wurde ein Bohrkopf entwickelt, mit dem Bohrungen in Hartgestein bis in Tiefen von 5000 m durchgeführt werden können. Konventionelle Bohrkronen stoßen aufgrund des Verschleißes an ihre Grenzen und müssen schon nach wenigen Metern getauscht werden.

Der entwickelte Bohrkopf arbeitet auf Grundlage des Elektro-Impuls-Verfahrens (EIV). Dabei werden mithilfe eines Downhole-Generators Impulsspannungen erzeugt. Diese werden einer Hochspannungselektrode zugeführt und erzeugen einen Durchschlag zwischen der Hochspannungs- und der Erdelektrode im Gestein, so dass dieses versagt und abgetragen wird. Im Laborversuch konnte die Funktionsfähigkeit des Bohrkopfs nachgewiesen werden. Der entwickelte EIV-Bohrkopf weist u. a. eine höhere Bohrgeschwindigkeit, weniger Verschleiß und einen geringeren Energiebedarf als konventionelle Bohrkronen auf.

Im Anschlussprojekt wird die Downhole-Energieversorgung des Impulsspannungsgenerators realisiert (Bild I).

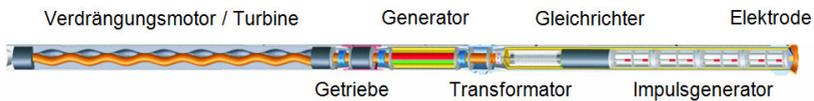


Bild I: Konzept für den EIV-Bohrkopf

Zum Abschluss des Projekts soll eine Bohrplattform entstehen, mit deren Hilfe Feldversuche mit dem gesamten EIV-Bohrsystem durchgeführt werden können (Bild II), um abschließend das System in eine kommerzielle Anlage zu überführen.



Bild II: Bohrloch im Laborversuch und Bohranlage für Feldversuche

Parallel zur Entwicklung des EIV-Bohrsystems werden Untersuchungen zum Durchschlagverhalten von Funkenstrecken durchgeführt.

Bei der Entwicklung des Impulsspannungsgenerators konnte festgestellt werden, dass aufgrund der Konfiguration des Generators (Funkenstreckenabstände, Stufenabstand, induktive Ladelemente, schnelle Impulsfolge, Gasdruck, u. a.) Fehlzündungen am Generator auftreten können. Dabei zünden einzelne Funkenstrecken nicht in der gewünschten Reihenfolge oder gar nicht. Daher wurden Untersuchungen zur Streuung der Durchschlagspannungen an Funkenstrecken verschiedener Materialien in Abhängigkeit des Funkenstreckenabstands und des Umgebungsdrucks bei schneller Impulsfolge durchgeführt. Es wurden jeweils etwa 5000 Impulse mit einer Frequenz von 100 Hz bei konstantem Druck zur Auswertung herangezogen (Bild III).

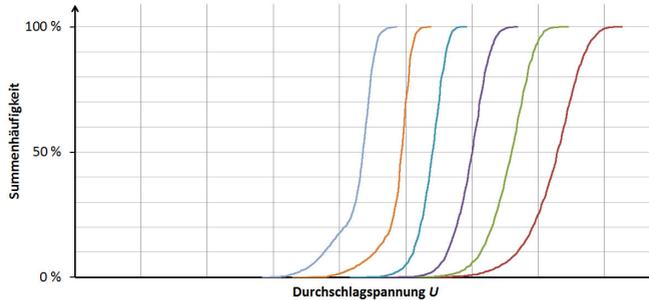


Bild III: Verteilung der Durchschlagspannung von Wolfram-Elektroden für 1,5 mm Abstand

Aus den Versuchsergebnissen wird ersichtlich, dass die Streuung der Durchschlagspannung mit größerem Gasdruck und kleinerem Elektrodenabstand ansteigt.

Beim EIV-Bohrkopf ist der vorhandene Bauraum das begrenzende Element. Somit muss sowohl mit kleinen Elektrodenabständen als auch mit erhöhtem Gasdruck gearbeitet werden. Die Durchschlagspannung mit der geringsten Streuung bei dieser Konfiguration weisen reine Wolframelektroden auf. Neben der Ermittlung der Durchschlagspannung werden die Zündzeitpunkte der einzelnen Funkenstrecken des Impulsspannungsgenerators messtechnisch erfasst.

Aufbauend auf den ermittelten Durchschlagspannungen und Zündzeitpunkte  $n$  werden Berechnungen mit einem Netzwerkmodell des Impulsspannungsgenerators durchgeführt, um die Auswirkungen der Streuung auf die Spannungsverteilung innerhalb des Generators und die Impulsform zu beurteilen.

## Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Strombelastbarkeit und Erwärmung“



Maher Bakka, Dipl.-Ing.

Reduzierung der elektromagnetischen Feldverteilungen durch Kompensationseile 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. Die Feldstärken werden in der Mitte des Spannungsfeldes, in einer Höhe von 1 m über dem Erdboden bewertet. Um die elektrische Feldstärke bei gegebener Leiterkonfiguration und Masthöhe zu reduzieren, wird in der Literatur z. B. der Einsatz von Kompensationseilen (KS) beschrieben [1].

Tabelle I: Position der Seile

Position	x in m	y in m
L <sub>13</sub> /L <sub>23</sub>	-5,4/5,4	46,5
L <sub>11</sub> /L <sub>21</sub>	-6,9/6,9	38
L <sub>12</sub> /L <sub>22</sub>	-5,4/5,4	31
P <sub>3</sub>	0	28
P <sub>4</sub>	0	27
P <sub>5</sub>	0	26
P <sub>11</sub>	-5,4	27
	5,4	27
P <sub>22</sub>	-5,4	26
	5,4	26

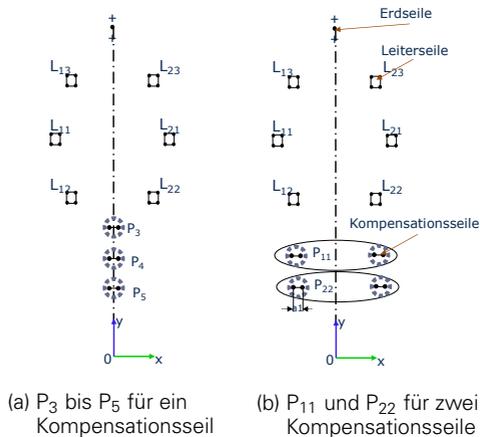


Bild I: Position der Kompensationseile

Um die Wirkung der Kompensationseile zu ermitteln, wurde die Verteilung der elektrischen Feldstärke für eine 400-kV-Leitung in Kompaktbauweise mit 2 Systeme, dem Mastbild Tonne und der Leiterkonfiguration  $\gamma$  (312-312) berechnet. Die Kompensationseile sind mit der Erdungsanlage der Masten leitend verbunden und liegen somit auf Erdpotential. Die Kompensationseile werden

in Form von Zweierbündeln ausgeführt und entweder einzeln (Bild Ia) oder als Paar am Mast (Bild Ib) befestigt (Tabelle I).

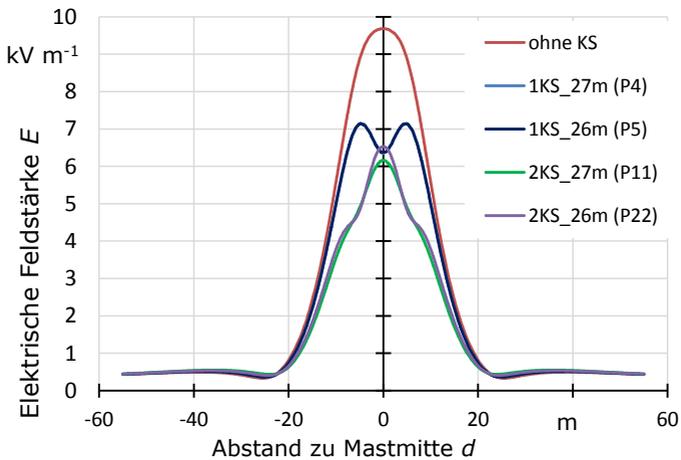


Bild II: Berechnete elektrische Feldstärke, abhängig von der Höhe des Kompensationsseiles bei einem Abstand  $a_1 = 400$  mm der Bündelleiter

Die Ergebnisse zeigen, dass durch den Einsatz von Kompensationsseilen die elektrische Feldstärke wesentlich reduziert werden kann (Bild II). Werden z. B. zwei Kompensationsseile in Position  $P_{11}$  verwendet, verringert sich die maximale Feldstärke von 9,7 kV/m auf 6,1 kV/m. Die Wirkung eines einzelnen Kompensationsseiles ist jedoch deutlich geringer (Tabelle II). Auch durch den Einsatz von Kompensationsseilen kann der Grenzwert der elektrischen Feldstärke von 5 kV/m für den betrachteten Mast nicht eingehalten werden. Der Mast muss zusätzlich um 1,5 m erhöht werden.

Tabelle II: Berechnete elektrische Feldstärke, abhängig vom Abstand  $a_1$  der Bündelleiter und die Positionen des Kompensationsseiles

$E/\text{kV m}^{-1}$	zweifaches Kompensationsseil		einzelnes Kompensationsseil		
	$P_{11}$	$P_{22}$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
	$h_y = 27$ m	$h_y = 26$ m	$h_y = 28$ m	$h_y = 27$ m	$h_y = 26$ m
100	6,6	6,9	7,4	7,39	7,4
200	6,4	6,7	7,3	7,3	7,28
300	6,3	6,6	7,2	7,2	7,2
400	6,2	6,5	7,1	7,1	7,1
500	6,1	6,4	7,1	7,1	7,1

[1] Bauhofer, P.: *Handbuch für Hochspannungsleitungen – niederfrequente elektromagnetische Felder und deren wirksame Reduktion*, Verband der Elektrizitätswerke Österreichs, Wien 1994.



Julian Heger, Dipl.-Ing.

### Untersuchungen zum Widerstand zwischen mehrdrähtigen Leitern und Massivleiter

Betriebsmittel der Elektroenergietechnik sind thermisch so zu dimensionieren, dass die Funktion und die geforderten Materialeigenschaften im Betrieb erhalten bleiben. Mit Wärmenetzen lassen sich die Temperaturen solcher Anlagen berechnen. Um die Erwärmung durch Stromwärmeverluste in den elektrischen Verbindungen berechnen zu können (Gleichung (1)), muss vorab deren elektrischer Widerstand ermittelt werden.

$$\Delta\vartheta = k I^2 R_V(\vartheta) R_{th} \quad (1)$$

In der Niederspannungstechnik werden zum Verbinden von Massivleitern und mehrdrähtigen Leitern u. a. Klemmen eingesetzt, welche den mehrdrähtigen Leiter direkt auf den Massivleiter pressen (Bild I).

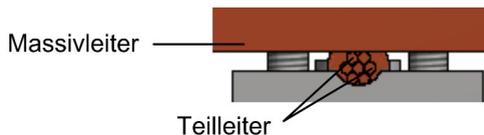


Bild I: Verbindung des Massivleiters und des mehrdrähtigen Leiters - nicht alle Teilleiter kontaktieren unmittelbar den Massivleiter

Bei dieser Verbindung kontaktieren nicht alle Teilleiter unmittelbar den Massivleiter, sodass die Stromverteilung auf die einzelnen Teilleiter in der Verbindung inhomogen ist. Zum Messen des Widerstandes der Verbindungen von mehrdrähtigen Leitern, z. B. Press- oder Schraubverbindungen, sind laut Norm sogenannte Ausgleicher einzubringen. Diese stellen eine Messstelle mit gleichem Potential über den gesamten Leitungsquerschnitt sicher [1]. Durch den Einsatz des Ausgleichers teilt sich der Strom im mehrdrähtigen Leiter anders auf als ohne Ausgleicher. Die nach Norm gemessenen Widerstände werden sich von den tatsächlich im Betrieb wirkenden Widerständen unterscheiden.

Um die Erwärmung einer Schaltgerätekombination zu berechnen, sind die tatsächlich im Betrieb auftretenden Widerstände der Verbindung heranzuziehen. Mögliche Alternativen zum Messen des Widerstandes mit Ausgleicher sind:

- Messen an den ausreichend langen, stromlosen Enden der Leiter mit und ohne Potentialausgleichsring
- Einzelmessung aller Teilleiter am Verbindungsende

In einem Vorversuch ist zu untersuchen, wie der tatsächlich wirkende Widerstand zwischen einem mehrdrätigen Leiter und einem Massivleiter gemessen werden kann (Bild II).

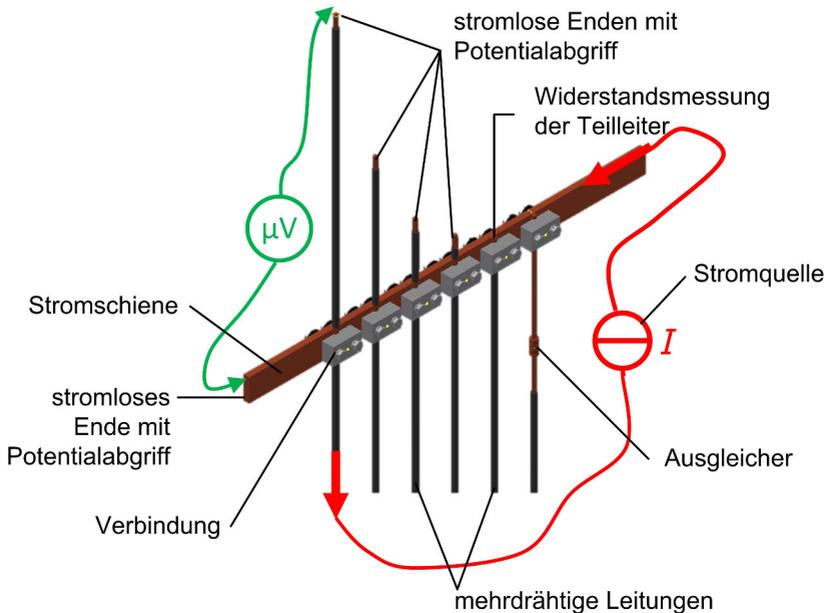


Bild II: Aufbau des Vorversuchs

Mit dem Messen der Verbindungswiderstände jedes einzelnen Teilleiters soll der Einfluss des Ausgleichers auf den Widerstand der gesamten Verbindung überprüft werden. Weiterhin ist zu untersuchen, ab welcher Länge die Enden des mehrdrätigen Leiters tatsächlich als stromlos betrachtet werden können. Dazu werden unterschiedliche Messungen bei verschiedenen Längen der stromlosen Enden durchgeführt. In einem späteren Schritt sollen die Erkenntnisse zum Messen des Widerstandes mehrdrätiger Leiter auf feindrätige Leiter erweitert werden.

[1] DIN EN 61238-1 VDE 0220-100:2004-03: *Pressverbinder und Schraubverbinder für Starkstromkabel für Nennspannungen bis einschließlich 36 kV ( $U_m = 42$  kV) - Teil 1: Prüfverfahren und Anforderungen.*

### 3.2.2 Publikationen

#### Vorträge

Bäumli, K.; Großmann, S.:

*Elektrisches und thermisches Verhalten elektrischer Kontakte von normal- und supraleitenden Materialien.* 8. Braunschweiger Supraleiterseminar, TU Braunschweig, 16.-17.06.2015

Esmaeil Moghadam, D.:

*Voltage Distribution in the Stator Winding of Drive-Fed Induction Motor.* Kolloquium Hochspannungs- und Anlagentechnik, Darmstadt, 17.07.2015

Gatzsche, M.:

*Elektrisch-thermisches Betriebsverhalten federnder Kontaktelemente bei Kurzschlussstrombelastung.* Kolloquium Hochspannungs- und Anlagentechnik, Darmstadt, 17.07.2015

Gatzsche, M.:

*Elektrisch-thermisches Betriebsverhalten von Verbindungen und Kontakten bei Kurzschlussstrombelastung.* Tag der Fakultät 2015, Dresden, 02.10.2015

Hering, M.:

*Forschungsgebiet Hochspannungstechnik - Einblicke in die Praxis.* UNI LIVE Schnupperstudium, Dresden, 15.01.2015

Hildmann, C.:

*Einfluss von Kraft- und Formschlussanteil auf das elektrische Kontaktverhalten von Pressverbindungen.* Tag der Fakultät 2015, Dresden, 02.10.2015

Schlegel, S.:

*Heiße Seile - Herausforderung Seilarmaturen.* Forum Netzbau- und Betrieb (Leitungsbautagung), 23. Fachtagung, Frankfurt am Main, 07.05. - 08.05.2015

Voigt, M.:

*Untersuchungen zur Streuung der Durchschlagspannung an Funkenstrecken eines Impulsspannungsgenerators mit hoher Impulswiederholrate.* Kolloquium Hochspannungs- und Anlagentechnik, Darmstadt, 17.07.2015

## Veröffentlichungen

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

*Electric Impulse Technology – long run drilling in hard rocks*. Fachartikel:  
Oil and Gas Journal,  
2015

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

*Electric Impulse Technology – long run drilling in hard rocks*. Proceedings  
of the 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic  
Engineering 2015,  
St. John's, Kanada, 2015

Anders, E.; Voigt, M.; Ziegler, A.:

*Elektroimpulsbohren für Tiefengeothermie*. 6. Baumaschinenfachtagung,  
Dresden, 2015

Bäumli, K.; Großmann, S.:

*Investigations on Different Joining Techniques Regarding Electrical Joints  
with Normal Conducting Material and YBCO Coated Conductors*. 12th  
European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS),  
Lyon (Frankreich), 6.-10.09.2015

Dreier, S., Großmann, S., Moustafa, G., Guimarães dos Santos, D., Da  
Rocha, B. R. P., Macedo, V. G.:

*The Long-term Behavior of Stationary Electrical Connections in Areas with  
Harsh Natural Environmental Conditions*, CIGRÉ Science & Engineering  
Journal, vol. 3,  
2015

Esmail Moghadam, D.; Speck, J.; Großmann, S.; Stahl, J.:

*Frequency and waveform effects on the turn Insulation lifetime*. 19th  
International Symposium on High Voltage Engineering,  
Pilsen, 2015

Esmail Moghadam, D.; Speck, J.; Großmann, S.; Stahl, J.:

*Interturn insulation quality assessment, considering the standards state*.  
19th International Symposium on High Voltage Engineering,  
Pilsen, 2015

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

*Elektrisch-thermisches Betriebsverhalten von Kontaktelementen für  
Hochstromanwendungen bei Kurzzeitstrombelastung*. 23.  
Albert-Keil-Kontaktseminar,  
Karlsruhe, 2015

Gatzsche, M.; Lücke, N.; Großmann, S.; Kufner, T.; Freudiger, G.:  
*Validity of the Voltage-Temperature Relation for Contact Elements in High Power Applications*. 61st IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, San Diego, 2015

Ghorbani, H.; Esmaeil Moghadam, D.; Rodriguez, P.:  
*Application of Subsynchronous Damping Controller to Static Var Compensator Preferred subtopic*. The 17th European Conference on Power Electronics and Applications, Genf, Schweiz, 08.09. - 10.09.2015

Hering, M.; Speck, J.; Backhaus, K.; Großmann, S.; Riechert, U.:  
*Capacitive-resistive transition in gas insulated DC systems under the influence of particles on the insulator surface*. 19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, 2015

Hering, M.; Speck, J.; Großmann, S.; Riechert, U.:  
*Feldumbildung in gasisolierten Systemen bei Gleichspannung*. RCC-Fachtagung, Berlin, 2015

Hering, M.; Speck, J.; Großmann, S.; Riechert, U.; Neuhold, S.:  
*Detection of particles on the insulator surface in gas insulated DC systems*. Highvolt-Kolloquium, Dresden, 2015

Hildmann, C.; Schlegel, S.; Großmann, S.; Dockhorn, T.:  
*Investigations on the long-term behavior of current carrying fittings for high temperature low sag conductors*. 23rd International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Lyon, 2015

Hildmann, C.; Schlegel, S.; Großmann, S.; Murr, M.; Lippmann, S.:  
*Einfluss von Kraft- und Formschlussanteil auf das elektrische Kontaktverhalten von Pressverbindungen*. 23. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 2015

Hildmann, C.; Schlegel, S.; Lücke, N.; Großmann, S.:  
*Vergleich genormter elektrischer Alterungsprüfungen für Verbindungen der Elektroenergietechnik mit Erkenntnissen aktueller wissenschaftlicher Untersuchungen*. 5. Symposium Connectors, Lemgo, 2015

Kühnel, C.; Schlegel, S.; Großmann, S.:

*Herausforderungen beim Einsatz von NH-Sicherungen (gG) in modernen Energieversorgungsnetzen.* Netzpraxis, Aug. 2015, Jg. 54, Heft 7-8, S. 28-30

August 2015

Kühnel, C.; Schlegel, S.; Großmann, S.:

*The influence of important ageing mechanisms on long-term behavior and reliability of fuse-links at higher temperatures.* 10th International Conference on Electrical Fuses and their Applications (ICEFA), Dresden, 2015

Pfeifer, S.; Schlegel, S.; Großmann, S.; Günter, F.:

*Betriebsverhalten von Verbindungen mit Leitern aus Aluminium und Kupfer.* 23. Albert-Keil Kontaktseminar, Karlsruhe, 2015

Ramonat, A.; Schlegel, S.; Großmann, S.; Kudoke, M.:

*Basic Investigations on Joints with Cylindrical Aluminum Conductors Made by Press- and Shrink-fit for High-current Devices.* 61st IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, San Diego, 2015

Shiri, A.; Esmail Moghadam, D.:

*A New Dynamic Model for Linear Induction Motors, Considering End Effect.* The 10th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA), Aachen, 27.07. – 28.07.2015.

Shiri, A.; Esmail Moghadam, D.:

*Normal Force Analysis in Secondary Sheet Single-Sided Linear.* The 10th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA), Aachen, 27.07. – 28.07.2015.

Speck, J.; Hering, M.; Backhaus, K.; Ovsyanko, I.:

*Breakdown behaviour under DC stress and its consequence on high voltage tests.* Highvolt-Kolloquium, Dresden, 2015

### 3.3 Preise und Auszeichnungen

#### „Best Student Paper“ - AUPEC 2015

Die 25. „Australasian Universities Power Engineering Conference“ (AUPEC) wurde dieses Jahr vom 27. bis zum 29. September in Wollongong (Australien) ausgerichtet. Im Rahmen der Konferenz wurde der von der Electric Energy Society of Australia (EESA) geförderte „Best Student Paper Award“ durch ein technisches Komitee vergeben. Unter den mehr als 100 eingereichten Veröffentlichungen wurde der Beitrag „Trend Identification in Power Quality Measurements“ von Herrn Max Domagk mit dem „Best Student Paper Award“ ausgezeichnet. Wir gratulieren recht herzlich.

#### „Best Student Paper“ - IYCE 2015

Vom 27. bis 30. Mai fand in Pisa (Italien) die 5th International Youth Conference on Energy (IYCE) statt.

Das Themengebiet umfasst neben der Energiebereitstellung, -speicherung und -übertragung auch deren Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit.

Unter den etwa 120 vorgestellten Arbeiten konnte der Beitrag „Visual approach to assess the environmental impact of overhead transmission lines“ von Dipl.-Ing. Niels Erdmann mit dem 1. Preis der „Student Paper Competition“ ausgezeichnet werden.

Wir gratulieren recht herzlich!



Prof. Schegner überreicht nachträglich stellvertretend die Trophäe

Foto: Ulrike Hendrich

## „John Neal Award“ des EEIM

Mit dem John Neal Award zeichnet die Vereinigung der European Electrical Insulation Manufacturers (EEIM) herausragende Arbeiten im Bereich flüssiger und fester elektrischer Isolationsmaterialien und –systeme aus. Den diesjährige Preis erhielt Karsten Backhaus für seinen Beitrag „Charge Carrier based Conductivity and Breakdown Model for Oil Paper Insulation under High DC Voltage“.

Im Unterschied zur etablierten resistiv-kapazitiven Modellvorstellung für das dielektrische Verhalten von Isolierwerkstoffen, entwickelte er in Anlehnung an die teilchendichteabhängigen Leitfähigkeitsmechanismen in Halbleitern ein physikalisch begründetes, ladungsträgerbasiertes Leitfähigkeitsmodell für Isolieröl und ölgetränkte Isolierpapiere. Damit können sowohl die nichtlinearen Leitfähigkeitseigenschaften als auch Ladungsträgerstaugebiete und die damit einhergehende durchschlagrelevante lokale Höchstfeldstärke in einer Isolierung bei Gleichspannungsbelastung berechnet werden. Ladungsträgerbasierte Berechnungsmodelle können zukünftig auch auf andere Isolierstoffe oder Wechselfspannungsbelastung mit Raumladungseinfluss angewendet werden. Wir gratulieren recht herzlich.



Preisübergabe an Karsten Backhaus

Foto: Michael Chapman

## Hans-Pundt-Preis 2014

Als Bestandteil der Innovations- und Nachwuchsförderung zeichnet der VDE Bezirksverein Dresden jährlich hervorragende Leistungen auf technisch-wissenschaftlichem Gebiet aus. Durch das Auszeichnen von Abschlussarbeiten in den Fachgebieten Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik möchte der VDE Bezirksverein Dresden einerseits Nachwuchs motivieren, andererseits soll die gesellschaftliche Bedeutung von Ingenieuren und ihrer Arbeit hervorgehoben werden.

Auf der Jahresmitgliederversammlung am 25.02.2015 wurde Herr Dipl.-Ing. Maximilian Schmidt für die Diplomarbeit „Untersuchungen zur Frequenz- und Spannungsregelung modularer Netze mit hohem Anteil erneuerbarer Energieanlagen“ mit dem Hans-Pundt-Preis 2014 ausgezeichnet.

Wir gratulieren recht herzlich.



Überreichung des Hans-Pundt-Preises

Foto: Günter Herbrich

## 2015 Paul and Dee-Dee Slade Young Investigator Award

Im Rahmen der jährlichen IEEE Holm Conference on Electrical Contacts wird der Paul and Dee-Dee Slade Young Investigator Award verliehen. Ziel ist es, hervorragende Leistungen junger Forscher auszuzeichnen und junge Wissenschaftler zu motivieren auf dem Gebiet der elektrischen Kontakte tätig zu werden.

In diesem Jahr erhielt Herr Michael Gatzsche auf der Konferenz in San Diego den Preis für die Veröffentlichung „Validity of the Voltage-Temperature Relation for Contact Elements in High Power Applications“. Wir gratulieren recht herzlich.



Übergabe des Young Investigator Awards

Foto: John J. Shea

## Zusatzpreis zum „EFB Projektpreis 2015“

In Bad Boll wurde im Rahmen des Kolloquiums der Europäischen Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung am 24. März 2015 der „EFB-Projektpreis“ für die am besten bewerteten EFB-Forschungsprojekte des vorangegangenen Jahres verliehen.

Wie in jedem Jahr richtet sich der Preis an junge Wissenschaftler, die ein EFB-Projekt der industriellen Gemeinschaftsforschung in herausragender Weise bearbeitet und abgeschlossen haben.

Der Zusatzpreis zum „EFB-Projektpreis 2015“ wurde erstmalig vergeben und ging an Herrn Dipl.-Ing. Jan Kalich und Herrn Dr.-Ing. Stephan Schlegel, die zahlreiche Projekte erfolgreich abgeschlossen haben. Den EFB-Projektpreis 2015 bekommen beide für das Vorhaben „Elektrisches Eigenschaftsprofil umformtechnischer Fügeverbindungen“ (AiF 16952BR, EFB-Forschungsbericht 389).



Preisträger EFB Projektpreis 2015



Preisträger Zusatzpreis zum „EFB Projektpreis 2015“

## „Young Researcher Award“ des ISH 2015 in Pilsen

Zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses und als Anerkennung hervorragender Forschungsarbeiten verlieh das Komitee des „19th International Symposium on High Voltage Engineering“ (ISH) 2015 den „Young Researcher Award“ an junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler.

Professor Rainer Haller überreichte als Chairman des ISH 2015 diesen Preis unter anderem an Frau Dipl.-Ing. Maria Hering für ihren Beitrag „Capacitive-resistive transition in gas insulated DC systems under the influence of particles on the insulator surface.“ Wir gratulieren recht herzlich.



Überreichung des Young Researcher Awards

Fotografen: Šárka Drozná, Michaela Smetanová und Ondra Veselý

### 3.4 Promotionen



Jörg Dickert, Dr.-Ing.

Synthese von Zeitreihen elektrischer Lasten basierend auf technischen und sozialen Kennzahlen  
Grundlage für Planung, Betrieb und Simulation von aktiven Verteilungsnetzen

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner – TU Dresden  
Prof. Dr.-Ing. habil. Zbigniew Antoni Styczynski – OVGU Magdeburg

Kenntnisse über das prinzipielle Verhalten der Lasten und deren Benutzung durch die Endabnehmer sind im Wesentlichen bekannt. Viele der aktuell notwendigen Untersuchungen benötigen jedoch konkrete Zeitreihen elektrischer Lasten, sogenannte Lastgänge. Mit der Synthese von Zeitreihen elektrischer Lasten können unter Berücksichtigung verschiedenster Anforderungen Lastgänge für ein Jahr mit einer Zeitauflösung von 30 s aufgebaut werden, wobei in der Arbeit der Fokus auf Haushaltsabnehmer liegt.

Wichtige Eingangsdaten für die Lastgangsynthese sind die technischen Kenngrößen der elektrischen Geräte und die sozialen Kennzahlen zur Benutzung der Geräte. Dafür werden die Haushaltsgeräte in fünf Geräteklassen nach Tabelle I eingeteilt und für die Haushalte sechs repräsentative Haushaltstypen nach Tabelle II verwendet. Die technischen Kennzahlen umfassen die Leistungsaufnahmen der Geräte im Betrieb. Für die sozialen Kennzahlen wurden umfangreich Statistiken ausgewertet, womit die Kennzahlen Ausstattungsgrade, Benutzungshäufigkeiten, Ein- und Ausschaltzeiten bzw. Betriebsdauern quantifiziert wurden. Damit wird ein neuer Ansatz gewählt, welcher nicht mehr auf die detaillierte Beschreibung des Bewohnerverhaltens beruht, da die Datenbereitstellung dafür äußerst schwierig ist.

Tabelle I: Beispiele der Einteilung einiger Geräte in Geräteklassen

Geräteklassen	Beispiele für Geräte
Grundlast	Router, WLAN, Telefone, Modems, Anrufbeantworter, Ladegeräte
Taktbetrieb (autonom)	Kühlgeräte Heizgeräte
aktive Ein/Aus (mit konstanter Leistung)	Mikrowellen Wasserkocher Kaffeemaschinen
Prozessablauf	Kochzonen Geschirrspüler
Beleuchtung	LED- und Energiesparlampen gemischte Leuchtmittelausstattung Glüh- und Halogenlampen

Tabelle II: Haushaltstypen nach Haushaltsgröße und -führung

Haushaltsgröße	Haushaltsführung	
	tagsüber anwesend	tagsüber abwesend
1-Personen	1: 1-Pers-HH anwesend	2: 1-Pers-HH abwesend
2 & 3-Personen	3: 2 & 3-Pers-HH anwesend	4: 2 & 3-Pers-HH abwesend
4+-Personen	5: 4+-Pers-HH anwesend	6: 4+-Pers-HH abwesend

Die Synthese wurde effizient in MATLAB<sup>®</sup> umgesetzt, welche in zwei Schritten erfolgt. Zuerst werden in Abhängigkeit der Geräteklasse für jedes Gerät Lastverläufe erstellt. Im zweiten Schritt werden diese Lastverläufe zu Lastgängen je Außenleiter zusammengeführt. Bei der Implementierung wurde die Umsetzung der verwendeten Algorithmen dadurch validiert, dass aus den künstlichen Lastverläufen die Daten der Leistungen bzw. Schalthandlungen zurückverfolgt und mit den Eingangsdaten verglichen wurden. Für die Plausibilisierung der Ergebnisse kann der Jahresenergieverbrauch oder die Jahreshöchstlast herangezogen werden, welche in Bild I für jeden Haushaltstyp mit jeweils 1.000 Haushalten in Box-Whisker-Plots aufgetragen sind.

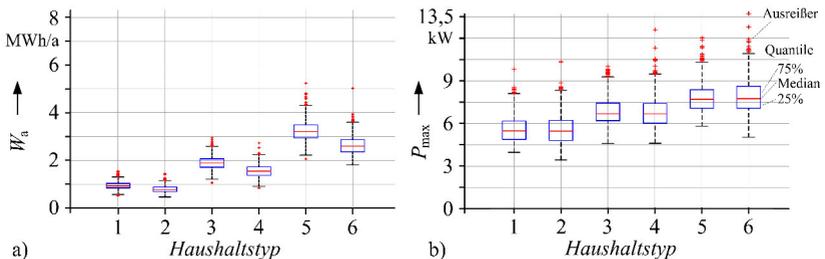


Bild I: Plausibilisierung von Lastgängen mit der a) Jahresenergieverbrauch und b) Jahreshöchstlast von je 1.000 Lastgängen je Haushaltstyp

In Verteilungsnetzen sind mit den erstellten synthetischen Zeitreihen umfangreiche und umfassende Untersuchungen realisierbar. Es gibt verschiedenste Möglichkeiten, die Zeitreihen zusammenzustellen. Mit Lastgängen je Außenleiter können beispielsweise unsymmetrische Zustände der Netze analysiert werden. Zudem können auch Lastgänge für Geräte bzw. Gerätegruppen erstellt werden, welche für Potenzialanalysen des Verbrauchsmanagement essenziell sind. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass viele Berechnungen nicht mehr auf deterministischen Extremwerten beruhen, sondern die stochastischen Eigenschaften der Endabnehmer mit den resultierenden Lastgängen berücksichtigt werden.



**Max Domagk, Dr.-Ing.**

**Identifikation und Quantifizierung korrelativer Zusammenhänge zwischen elektrischer sowie klimatischer Umgebung und Elektroenergiequalität**

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner – TU Dresden  
Prof. Dr.-Ing. Johanna Myrzik – TU Dortmund

Eine angemessene Qualität der Elektroenergie ist Grundvoraussetzung für den störungsfreien Betrieb aller angeschlossenen Geräte und Anlagen und spielt in den Verteilungsnetzen moderner Industriegesellschaften wie Deutschland eine zentrale Rolle. Die Elektroenergiequalität (EEQ) wird in Strom- und Spannungsqualität unterteilt. Während die Stromqualität maßgeblich im Verantwortungsbereich der Hersteller von Geräten und Anlagen liegt, sind die Netzbetreiber im Wesentlichen für die Sicherstellung einer angemessenen Spannungsqualität verantwortlich. Durch die technische Weiterentwicklung und den Einsatz neuer Gerätetechnologien sowie die zunehmende Integration dezentraler Erzeugungsanlagen wie Photovoltaikanlagen ist zu erwarten, dass die EEQ auch künftig weiter an Bedeutung gewinnt.

Die EEQ im Niederspannungsnetz ist abhängig von Ort und Zeit und wird durch verschiedene Qualitätskenngrößen beschrieben. Die örtliche und zeitliche Abhängigkeit resultieren aus einer Vielzahl verschiedener Einflussfaktoren, welche sich entweder der elektrischen oder der nicht-elektrischen Umgebung des betrachteten Verteilungsnetzes zuordnen lassen (vgl. Bild I). Die elektrische Umgebung wird durch die Art und Anzahl angeschlossener Verbraucher bzw. Erzeuger (Abnehmer- bzw. Erzeugerstruktur) sowie Struktur und technische Parameter des Verteilungsnetzes (Netzstruktur) bestimmt. Die nicht-elektrische Umgebung umfasst u.a. Einflüsse der klimatischen Umgebung wie bspw. Temperatur oder Sonneneinstrahlung.

In der vorliegenden Arbeit erfolgt die systematische Identifikation korrelativer Zusammenhänge zwischen den genannten Umgebungseinflüssen und der EEQ sowie deren Quantifizierung auf Basis geeigneter Indizes und Kenngrößen. Die Ergebnisse der Arbeit helfen grundlegende Prinzipien der Ausprägung der Elektroenergiequalität im öffentlichen Verteilungsnetz besser zu verstehen sowie die Verteilungsnetze im Hinblick auf die Elektroenergiequalität zu charakterisieren und zu klassifizieren. Analog zu den Standard-Lastprofilen erfolgt die Definition von Standard-Qualitätsprofilen.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass das Abnehmer- und Erzeugerverhalten im Verlauf eines Tages variiert und eine Änderung der Stromqualität bedingt. Besonders das Verbrauchsverhalten der Abnehmer kann sich an verschiedenen Wochentagen (z.B. an Werktagen und Wochenenden) deutlich unterscheiden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass zusätzlich eine indirekte Beeinflussung der Stromqualität durch die klimatische Umgebung erfolgen kann

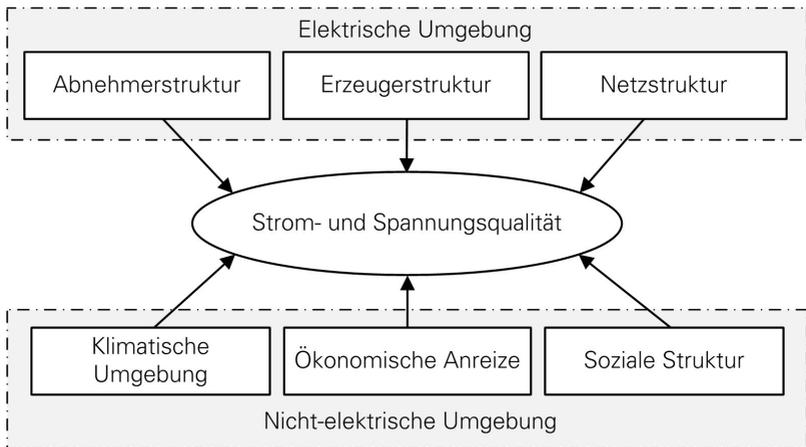


Bild I: Beeinflussung der Elektroenergiequalität

und die Temperatur und die Sonneneinstrahlung zu den Wetterkenngrößen mit dem größten Beeinflussungspotential zählen.

Innerhalb eines Jahres können zudem saisonale Effekte im Verlauf der wochenweise berechneten Qualitätskenngrößen identifiziert werden. Es lassen sich die Variationen quantifizieren und die Jahreszeiten bestimmen, in denen die höheren Emissionsniveaus auftreten. Saisonale Variationen sind für mehr als 30 % der untersuchten Messungen vorhanden und haben entweder in den Winter- oder Sommermonaten höhere Emissionsniveaus.

Über einen Zeitraum mehrerer Jahre können in den Zeitreihen der Qualitätskenngrößen zusätzlich Trendentwicklungen auftreten, die sich automatisch extrahieren lassen. Für etwa ein Drittel der Messungen mit einer Dauer von mehr als zwei Jahren existieren signifikante Trendentwicklungen. Eine allgemeine Aussage zu den Tendenzen lässt sich nicht ableiten, da positive sowohl als negative Trendentwicklungen für einzelne Qualitätskenngrößen beobachtet wurden.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Oberschwingungsstrom im Niederspannungsnetz maßgeblich durch die 3. und die 5. Stromharmonische geprägt wird. Die Stromqualität wird durch den Charakter der Abnehmerstruktur am stärksten beeinflusst. Neben den qualitativen Unterschieden für die Tages- und Wochenzeitreihen hängt die Höhe der Emission auch von der Anzahl angeschlossener Kunden (z. B. Haushalte) ab. Entsprechende „Skalierungsfaktoren“ wurden aus den Messdaten bestimmt. Für die durchgeführten Messungen besteht die Erzeugerstruktur ausschließlich aus PV-Anlagen, deren Einfluss im Vergleich zur Abnehmerstruktur gering ausfällt. Eine Beeinflussung der Stromqualität durch die Netzstruktur konnte nicht nachgewiesen werden.



Michael Elst, Dr.-Ing.

Simulation von resistiven Strombegrenzern auf Basis von Hochtemperatur-Supraleitern und Entwurf eines Schutzalgorithmus für den Einsatz in Energieverteilungsnetzen

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner – TU Dresden  
Prof. Dr.-Ing. habil. Lutz Hofmann – Leibniz Universität Hannover

In Energieversorgungsnetzen kann es lokal zu einem Ansteigen der Kurzschlussleistung und somit zur Überschreitung des maximal zulässigen Kurzschlussstromes kommen. Mit Hilfe von kurzschlussstrombegrenzenden Einrichtungen kann dem entgegengewirkt werden. Eine Möglichkeit dafür ist der supraleitende Strombegrenzer.

Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit ist ein resistiver Strombegrenzer aus keramischen Verbundleiterplatten. Als Supraleitermaterial wurde Yttrium-Barium-Kupferoxid eingesetzt (YBCO). Dieses Material ist ein Hochtemperatur-Supraleiter, der eine Kühlung mit flüssigem Stickstoff gestattet. Auf dem Supraleiter befindet sich eine Goldschicht. Dieser Verbundleiter bildet auf dem keramischen Träger eine Spirale.

Der erste Teil der Arbeit enthält die Simulation einer Verbundleiterplatte, im zweiten Teil wird eine Schutzfunktion für den Strombegrenzer entworfen.

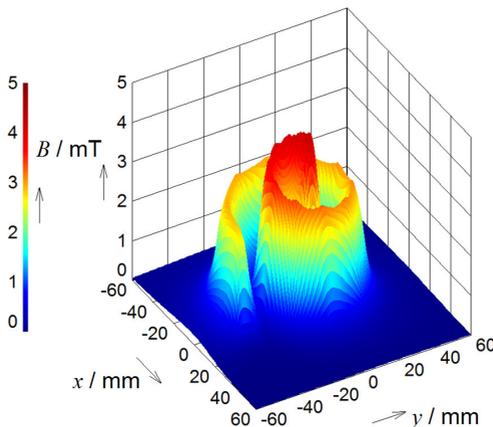


Bild 1: Induktionsprofil in der Verbundleiterebene

Im Simulationsmodell der Verbundleiterplatte werden neben dem Strom auch die Induktion und die Temperatur berechnet. Die Platten werden sehr ungleichmäßig durch Strom und Temperatur belastet. Der Einsatz des Überganges aus der Supraleitung in die Normalleitung, auch Quench genannt, wird durch das

Magnetfeld festgelegt. Damit bestimmt dieses die Stromverteilung und letztlich auch die Temperaturverteilung im Supraleiter. Bild I zeigt das Induktionsprofil in der Nähe des Supraleiters. Durch die Spiralstruktur des Verbundleiters ist die Induktion im Bereich der größten Leiterkrümmung auch am höchsten. Ebenso ist an diesen Stellen der größte Temperaturanstieg während der Begrenzung zu verzeichnen. Der maximal 50 ms dauernde Begrenzungsvorgang kann als adiabatisch angesehen werden.

Während des Betriebes muss der Strombegrenzer durch eine eigene Einrichtung beobachtet und geschützt werden. Der Quenchvorgang ist wesentlich schneller als gewöhnliche Vorgänge in Energieversorgungsnetzen. Daher muss die Überwachungseinrichtung dafür ausgelegt sein. Das Messen der Spannung über dem Strombegrenzer realisiert ein Spannungs-Längsdifferentialschutz. Damit kann der Quench detektiert werden.

Mit einer zusätzlichen Messung des Stromflusses durch den Strombegrenzer wird die Überwachungseinrichtung dahingehend erweitert, auch Fehler während des Begrenzungsvorganges erkennen zu können. Durch ein in der Arbeit vorgestelltes Verfahren erfolgt die Berechnung des Widerstandsverlaufs des Strombegrenzers in Abhängigkeit der darin eingebrachten Energie  $R(\Delta E)$ . Dies ist eine Näherung für die tatsächliche Widerstands-Temperatur-Kennlinie des Strombegrenzers  $R(\Delta T)$ . Damit kann diese Kurve auf Einhaltung eines bestimmten Bereiches, unabhängig von den Netzverhältnissen und der Begrenzungsdauer, überwacht werden. Bild II zeigt mehrere Vorgänge mit verschiedenen Spannungen, Strömen und Begrenzungsdauern, die in dieser Darstellung praktisch in einem Bereich liegen. Mit einem erhöhten Analyseaufwand ist es ebenso möglich, Teilüberschläge innerhalb einer Phase im Strombegrenzer zu detektieren, die bisher mit keinem anderen Schutzverfahren erkannt werden können.

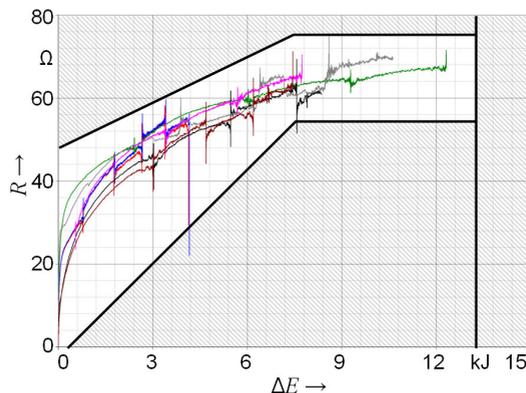


Bild II:  $R(\Delta E)$  und Überwachungsbereich



Sven Höpfner, Dr.-Ing.

**Verfahren zur Beurteilung der Erdschlusslichtbogenlöschung in resonanzsternpunktgeerdeten Verteilungsnetzen unter besonderer Berücksichtigung der Harmonischen**

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner - TU Dresden  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Lothar Fickert - TU Graz

Die betrieblichen und technischen Entwicklungen haben zu erheblichen Veränderungen in den MS-Verteilungsnetzen geführt. MS-Verteilungsnetze mit Resonanzsternpunktterdung (RESPE) sind in Mitteleuropa weit verbreitet. Der größte Vorteil dieser Art der Sternpunktbehandlung von MS-Verteilungsnetzen liegt in dem möglichen Weiterbetrieb im Falle eines einpoligen Erdfehlers. Dies wird durch eine Minimierung des Fehlerstromes an der Fehlerstelle und den daraus resultierenden ausreichend geringen Schritt- und Berührungsspannungen begründet. Des Weiteren ergibt sich durch den geringen Fehlerstrom an der Fehlerstelle die Möglichkeit eines selbstlöschenden einpoligen Erdschlusslichtbogens.

In dieser Ausarbeitung wurden Wege zur Abschätzungen der Löschfähigkeit von einpoligen Erdschlusslichtbögen gefunden. Durch eine optimale Einstellung der Erdschlusskompensation steigt der Einfluss der Harmonischen deutlich an, wobei deren Auswirkungen auf das Brenn- bzw. Löschverhalten einpoliger Erdschlusslichtbögen vollkommen ungeklärt waren. Besondere Berücksichtigung fanden dabei Spannungen und Ströme mit Frequenzen, die ein Vielfaches der Netzgrundfrequenz betragen.

Auf Basis des am IEEH vorhandenen Erdschlussauswerteprogramms entstand von diesem eine objektorientierte Version. Es wurden Algorithmen entwickelt, die es ermöglichen, schiefe Glockenkurven (Resonanzkurven), welche durch systematische Spannungswandlerfehler verursacht werden können, mathematisch zu bewerten und diese zu korrigieren. Es ist möglich, neben der Verschiebung, Vergrößerung und Verkleinerung auch die Drehungen des Ortskreises zu korrigieren. So kann eine fehlerfreie Resonanzkurve zur Eruierung von Netzparametern gefunden werden. Diese Netzparameter stellen die Basis für die simulationstechnische Nachbildung.

Es wurden in den untersuchten MS-Verteilungsnetzen Erdschlusslichtbögen bei Sonnenschein und dichtem Sprühregen gezündet und messtechnisch erfasst. Es wurden die signaltheoretischen Möglichkeiten eruiert, die Signalanteile dieser einpoligen Erdschlusslichtbogenströme zu bestimmen. Die Frequenzanteile dieser zeitlich sehr kurzen Signale (selbstverlöschende Lichtbögen) konnten mit Hilfe der Prony-Methode bestimmt werden.

In einem weiteren Arbeitspaket wurde ein allgemeiner Ansatz gefunden, mit begrenztem rechentechnischem Aufwand aus den Harmonischen der Spannungen, die zu erwartenden Harmonischen des Fehlerstromes im einpoligen

Erdfehlerfall für einen bestimmten Fehlerort des jeweiligen MS-Verteilungsnetzes zu bestimmen.

Mit Hilfe von ATP/EMTP konnten umfangreich systematische Untersuchungen bzgl. des Brenn- bzw. Löschverhaltens einpoliger Erdschlusslichtbögen in RESPE-MS-Verteilungsnetzen durchgeführt werden, um ursachenbezogene differenzierte Aussagen zu erhalten. Es wurden für diese Simulationsrechnungen in ATP/EMTP Werkzeuge entwickelt, welche die Auswertung der Simulationsrechnungen vereinfachten und eine automatisierte Steuerung und Auswertung der Variantenuntersuchungen in ATP/EMTP mit Matlab zuließen. Es wurde ein am IEEH vorhandenes Lichtbogenmodell für die Simulation in ATP Draw weiterentwickelt. Das verwendete Modell bildet sowohl das Verlöschen, als auch das Wiederezünden des stromschwachen Erdschlusslichtbogens nach. Damit ist es möglich, Grundsatzuntersuchungen zum Löschverhalten von einpoligen Erdschlusslichtbögen durchzuführen. Der einpolige Erdschlusslichtbogen wurde an verschiedenen Stellen im simulierten MS-Verteilungsnetz nacheinander in jedem Leiter eingelegt und mit Hilfe des Lichtbogenmodells nachgebildet. Dabei wurde je ein für das Brenn- bzw. Löschverhalten entscheidender Parameter variiert. Verändert wurden der Zündzeitpunkt, die Verstimmung, die Dämpfung, die Phasenlage der Harmonischen und dies bei jeweils unterschiedlichen Einspeiseorten und -pegeln der eingespeisten harmonischen Ströme. Mögliche Sonderzustände des MS-Verteilungsnetzes, z. B. die Ersatzkompensation, wurden untersucht.

Die wichtigsten Ergebnisse der simulationstechnischen Variantenuntersuchung sind:

- Eine große Entfernung der Fehlerstelle vom den Fehler speisenden Umspannwerk (Standort Petersenspule) zeigt ein schlechteres Löschverhalten des einpoligen Erdschlusslichtbogens.
- Ein Anstieg des harmonischen Pegels zeigt ein schlechteres Löschverhalten. Die Harmonischen können zwar durch die zusätzlichen Nulldurchgänge zum schnelleren Verlöschen des Lichtbogens beitragen. Allerdings überwiegt schnell der durch die Harmonischen erzeugte höhere Effektivwert des Fehlerstromes. Somit haben die Harmonischen eine deutliche Verschlechterung des Lichtbogenlöscherhaltens zur Folge.
- Bei Überkompensation ist ein besseres Löscherhalten zu erkennen. Gerade bei Einspeisung von Harmonischen und Fehlern an entfernten Fehlerstellen ist dieses Verhalten zu beobachten.
- In den drei verschiedenen Leitern eines Übertragungssystems wurden deutlich differente Lichtbogenbrenn- und Löscherhalten festgestellt. Auch durch diese Erkenntnis ist die globale Festlegung eines maximalen Reststromes in RESPE MS-Verteilungsnetzen nicht zu empfehlen.

Zusammenfassend wurden im Gegensatz zu der bisherigen sehr allgemeinen, nur auf die Nennspannungen bezogenen, Aussagen zu den maximal zulässigen Erdschlussrestströmen differenzierte ursachenbezogene Aussagen gewonnen, welche in ihren Grundzügen Eingang in die aktuelle Normendiskussion fanden.



Stephanie Pfeifer, Dr.-Ing.

**Einfluss intermetallischer Phasen der Systeme Al-Cu und Al-Ag auf den Widerstand stromtragender Verbindungen im Temperaturbereich von 90 °C bis 200 °C**

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann - TU Dresden  
Prof. Dr.-Ing. Gunther Göbel - HTW Dresden

Im Netz der Elektroenergieversorgung werden einzelne Netzkomponenten und Betriebsmittel durch Verbindungen zusammengeschaltet. Dabei werden häufig Schraubenverbindungen mit Stromschiene eingesetzt. Diese müssen über mehrere Jahrzehnte zuverlässig hohe Ströme tragen können. Abhängig von der sich einstellenden Temperatur an den Verbindungen altern diese mit der Zeit. Die Alterung wird je nach Verbindungssystem von verschiedenen Mechanismen beeinflusst, die alle parallel ablaufen. Bei ruhenden, stationären stromtragenden Verbindungen, deren Kontaktpartner aus verschiedenen Materialien bestehen, können abhängig von der Paarung intermetallische Phasen (IMP) entstehen. Diese haben schlechtere elektrische und mechanische Eigenschaften als die reinen Metalle und führen zu einem höheren Verbindungswiderstand. Damit erhöht sich die erzeugte Verlustleistung, die Temperatur der Verbindung und es kann zum Ausfall dieser kommen. In der Elektroenergie-technik werden aufgrund ihrer guten elektrischen Leitfähigkeit häufig die Werkstoffe Aluminium und Kupfer sowie das Beschichtungsmetall Silber bei Temperaturen von üblicherweise 90 °C bis 200 °C eingesetzt. Speziell bei Aluminium-Kupfer-Verbindungen, die nicht langzeitstabil sind, wird als maßgebliche Ausfallursache in der Literatur das Bilden von IMP gesehen.

Deshalb wurden phasenreine IMP der Systeme Al-Cu und Al-Ag mit verschiedenen Verfahren hergestellt. Mit einer speziell für diese Proben entwickelten Messeinrichtung wurden der spezifische elektrische Widerstand der IMP  $\rho_{20IMP}$  und dessen Temperaturbeiwert  $\alpha_{T,IMP}$  ermittelt und mit Werten aus der Literatur verglichen. Alle ermittelten Werte  $\rho_{20IMP}$  sind höher als für die reinen Metalle. Für die  $\gamma_2$ -Phase ( $Al_4Cu_9$ ) und die  $\mu$ -Phase ( $Ag_3Al$ ) sind die Werte deutlich höher als in der Literatur angegeben. Der Temperaturbeiwert ist für alle Phasen niedriger als der für Metalle übliche Wert von ca.  $4 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ .

Gleichzeitig wurden an verschiedenen Schraubenverbindungen mit Stromschiene Langzeitversuche durchgeführt. Dabei wurden Aluminium- und Kupferstromschiene direkt miteinander verschraubt oder Kontaktelemente, wie z. B. AlCu-Blech, im Verbindungsbereich oder galvanisch verkupferte und kupferummantelte Stromschiene aus Aluminium verwendet. Mit Ausnahme der Verbindungen, bei denen die Stromschiene blank, also ohne Beschichtung oder Kontaktelement verschraubt wurden, zeigten alle Varianten während der Versuchsdauer von 1 bis 3 Jahren einen konstant niedrigen Verbindungswiderstand. An drei verschiedenen Verbindungssystemen wurde zusätzlich der

Einfluss der Beanspruchung mit Dauerlast und Wechsellast untersucht. Es wurde gezeigt, dass die Dauerlast für die untersuchten Verbindungssysteme der kritischere Fall ist.

Der Einfluss der IMP auf den Verbindungswiderstand wurde über den Faktor  $q$  definiert, der das Verhältnis der Kontaktwiderstände im gealterten Zustand mit IMP zum Ausgangszustand ohne IMP angibt. Dieses Verhältnis wurde theoretisch mit den ermittelten elektrischen Parametern und Diffusionsparametern aus der Literatur berechnet. Für die Langzeitversuche wurde der Einfluss direkt aus den Messwerten bestimmt (Bild I).

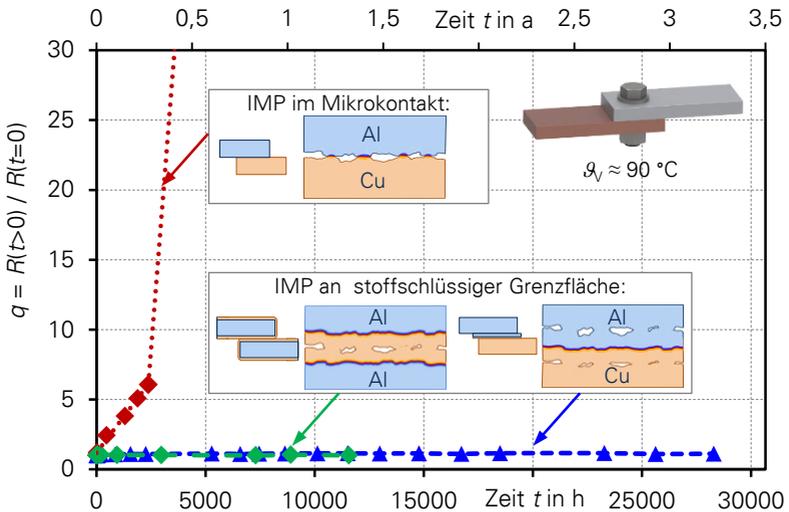


Bild I: Experimentell ermittelter Einfluss der IMP auf elektrische Verbindungen als Faktor  $q$  abhängig von der Zeit (gealterter Zustand mit IMP bezogen auf den Ausgangszustand ohne IMP)

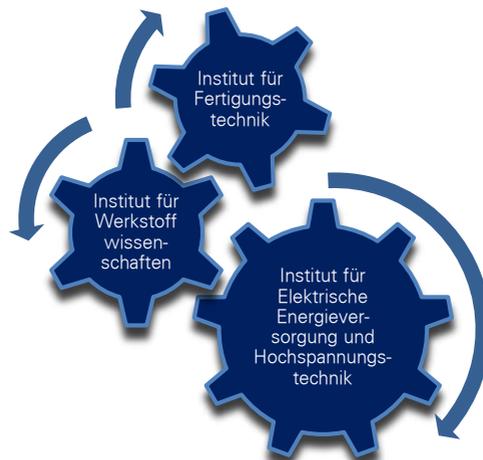
Für Verbindungen, bei denen Aluminium und Kupfer an einer stoffschlüssigen Grenzfläche aufeinander treffen ist der Einfluss der IMP nur sehr gering. Die Langzeitversuche bestätigen für diese Verbindungen ein gutes Langzeitverhalten. Mit der Paarung Al-Cu im Mikrokontakt ist der theoretische Einfluss der IMP größer. Aus den Langzeitversuchen ist ersichtlich, dass die gesamte Alterung nicht allein durch das Bilden intermetallischer Phasen bestimmt wird. Das Bilden von IMP bei Bimetallverbindungen ist damit nicht alleinige Ursache für das schlechte Langzeitverhalten der Schraubenverbindungen mit Stromschiene. Es ist mindestens ein weiterer Alterungsmechanismus an der Degradation der Verbindungen beteiligt. Ausgehend von den Beobachtungen während der Herstellung der IMP und den Ergebnissen aus den Langzeitversuchen wurde die Theorie aufgestellt, dass Sauerstoff einen wesentlichen Einfluss auf das schlechte Langzeitverhalten haben kann. Weitere Untersuchungen sind derzeit in Arbeit.



## 4 Kooperationen

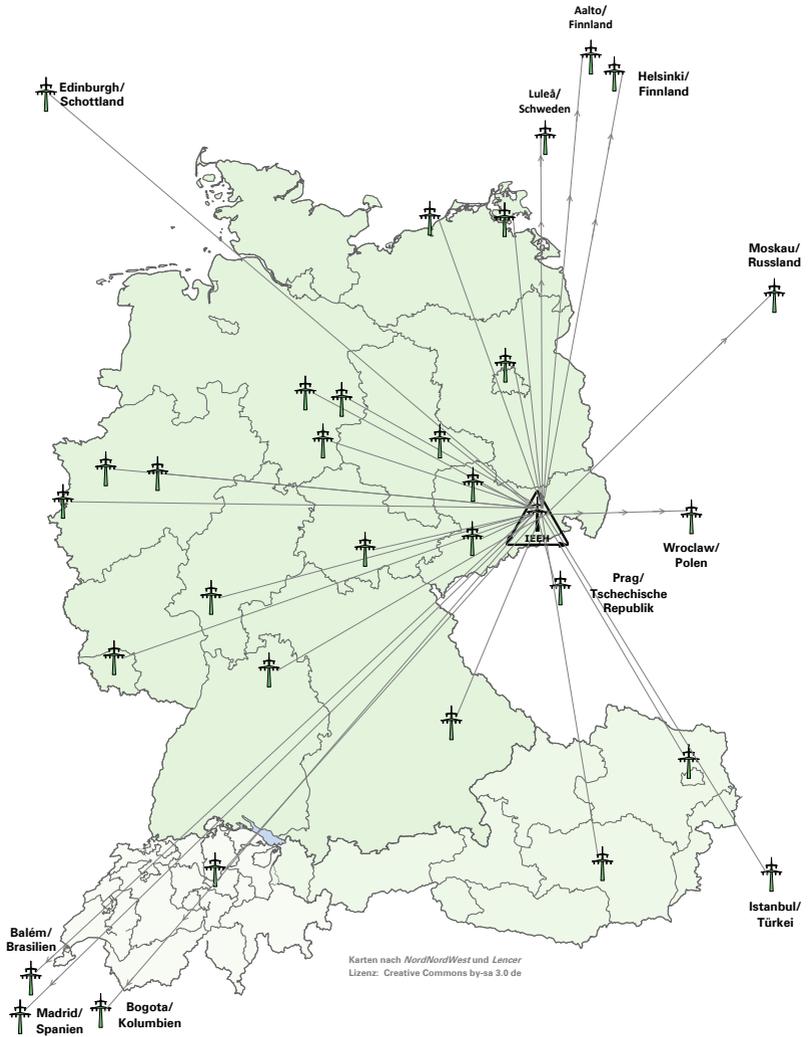
### 4.1 Forschungsk Kooperation im Bereich Ingenieurwissenschaften der TUD

Aktuelle Forschungsprojekte im Bereich Hochspannungs- und Hochstromtechnik erfordern ein interdisziplinäres Verständnis der im betrachteten System ablaufenden Prozesse. Dies ist notwendig, um physikalische Effekte zu verstehen, Modellvorstellungen zu entwickeln oder bestehende Zusammenhänge zu erweitern. Aus diesem Grund wurde durch Kooperation in gemeinsamen Projekten die Vernetzung im Bereich Ingenieurwissenschaften in den letzten Jahren immer weiter ausgebaut und vertieft. Dabei wurden öffentlich geförderte Projekte gemeinsam bearbeitet aber auch Fragestellungen in industriellen Forschungsprojekten miteinander betrachtet und gelöst. Hierfür möchten wir uns bei den beteiligten Mitarbeitern für die sehr gute Zusammenarbeit bedanken. Zu nennen ist insbesondere das Institut für Werkstoffwissenschaft, das Institut für Fertigungstechnik mit den Lehrstühlen Fügetechnik und Montage, Formgebende Fertigungsverfahren, Laser und Oberflächentechnik sowie Fertigungsmesstechnik und Qualitätssicherung.



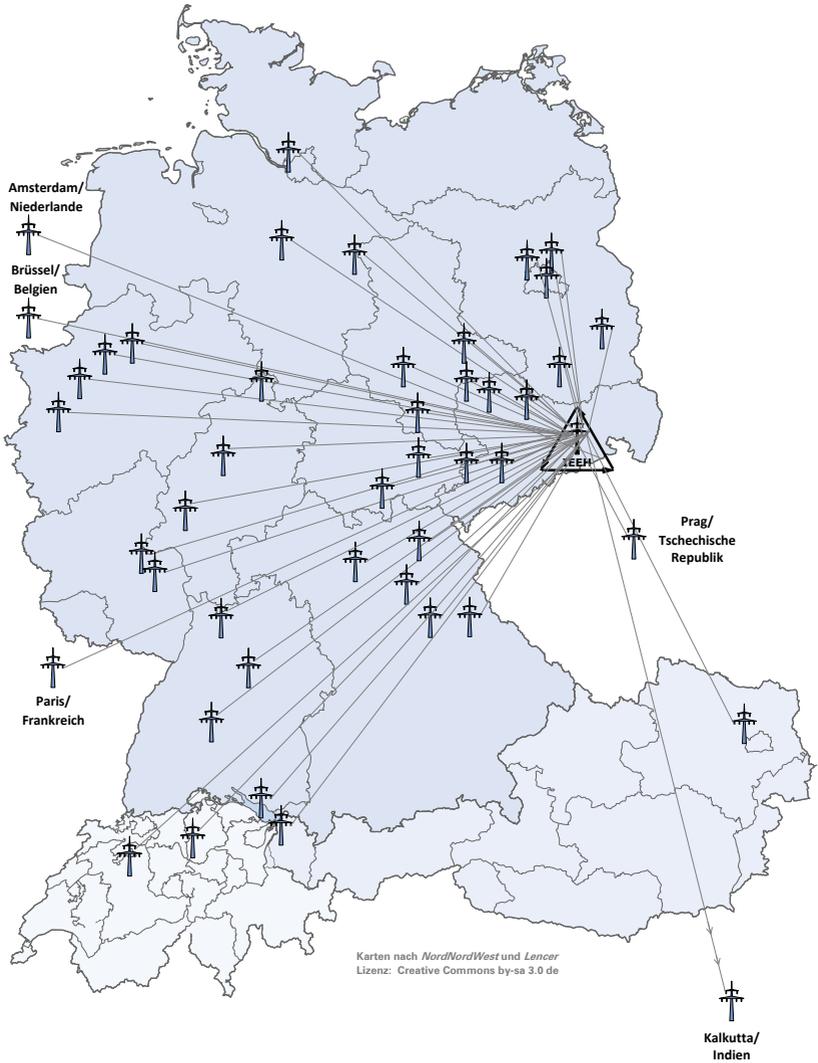
## 4.2 Wissenschaftskooperationen

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  
Gesellschaft für Technische Thermochemie und -physik mbH  
Helsinki University of Technology  
Hochschule Zittau/Görlitz (FH)  
HTW Dresden  
HTW Saarland, Saarbrücken  
HTWK Leipzig  
Hydro Aluminium Rolled Products GmbH, Forschung & Entwicklung  
INP Greifswald e. V.  
Luleå University of Technology  
MIKES, Finnland  
MPEI Moskau Russland  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
Oncoray Dresden  
Port Said University- Electrical Engineering Department, Ägypten  
Physikalisch-Technische Bundesanstalt - PTB Braunschweig  
Red Eléctrica de España  
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  
Yildiz Technical University



### 4.3 Industriekooperationen

50Hertz Transmission GmbH	LTB Leitungsbau GmbH
ABB Asea Brown Boveri Ltd	LTi Motion GmbH
Alcan Singen GmbH und CO. KG	Maschinenfabrik Reinhausen
Alexander Binzel Schweisstechnik GmbH & Co. KG	MERSEN Deutschland FFM AG
ALSTOM Grid	MITNETZ Strom GmbH
Amprion GmbH	Multi-Contact AG
AREVA Energietechnik GmbH	Neldner Consult
ASBESCO (INDIA) PVT. LTD.	Netzdienste Rhein/Main GmbH
Avacon AG	NetzeBW GmbH
A.Eberle GmbH & Co.KG	Nexans Power Accessories Germany GmbH
Betonbau GmbH	NH-HH-Recyclingverein
Bosch AG	Omicron electronics GmbH
BSD Bildungs- und Servicezentrum GmbH	Optocon AG
Cellpack GmbH	Österreichische Bundesbahnen-Holding Aktiengesellschaft
Dehn & Söhne GmbH	PARTZSCH Elektromotoren e. K
DNV GL Energy	Pfiffner Messwandler AG
Doble Lemke GmbH	PPC Insulators GmbH
DREWAG Stadtwerke Dresden GmbH	ProRail N.V.
E.ON Avacon	Ribe-SubCon GmbH
E.ON Bayern AG	Richard Bergner Elektroarmaturen GmbH & Co. KG
E.ON edis AG	RITZ Instrument Transformers GmbH
ELECTRONICON Kondensatoren GmbH	Robert Bosch GmbH
Elektrokeramik Sonneberg GmbH	RWE AG
EnBW Energie Baden-Württemberg AG	R. Stahl AG
ENSO Energie Sachsen Ost AG	Schweizerische Bundesbahnen
envia Mitteldeutsche Energie AG	Scheidt GmbH & Co KG
ESA Elektroschaltanlagen Grimma GmbH	Schneider Electric GmbH
Europoles GmbH & Co. KG	SGB Neumark GmbH
EWZ - Elektrizitätswerk der Stadt Zürich	SGS Société Générale de Surveillance Holding (Deutschland) GmbH
FEAG GmbH	Siemens AG
Fichtner GmbH & Co. KG	SMA Technologie GmbH
fuseXpert	SMT & HYBRID GmbH
GAHL Hochleitungsbau	Société Nationale des Chemins de fer Français - SNCF Frankreich
GWT-TUD	Stadtwerke Oranienburg
Heine Resistors GmbH	TenneT TSO GmbH
HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH	ThyssenKrupp Aufzüge GmbH
Infrabel AG Belgien	TÜV Süddeutschland Holding AG
Infraserv GmbH & Co. Höchst KG	Tyco Electronis AG
ivis gmbh	Vattenfall Europe Distribution GmbH
Jean Müller GmbH	VEM motors GmbH
Korropol GmbH	VEM Sachsenwerk GmbH
Lanz Oensingen AG	Werner Industrielle Elektronik - Werner GmbH
LAPP Insulator GmbH	Witthinrich GmbH
Linde Materialhandling GmbH	Cellpack



## 4.4 Kommissions- und Gremienarbeit

### 4.4.1 Lehrstuhl Elektroenergieversorgung

Dozent Dr.-Ing. Hartmut Bauer

- VDE-Ausschuss *Sicherheits- und Unfallforschung* (stv. Obmann)
- VDE Dresden *Geschichte der Elektrotechnik* (Vorsitzender)
- VDE Dresden Arbeitskreis: *Koordination der Isolation*

Dr.-Ing. Jörg Dickert

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

Dipl.-Ing. Niels Erdmann

- VDE Task Force *Grundsätzliche Auslegung Neuer Netze*

Dr.-Ing. Jan Meyer

- VDE Dresden Arbeitskreis: *Netzurückwirkungen*
- DK CIREN und CIREN Session Advisory Group (Session 2)
- German national Committee CIGRÉ
- C4 CIREN/CIGRÉ Working Group C4.24 *Power Quality and EMC Issues Associated with Future Electricity Networks*
- CIGRÉ Working Group C6/C4.29 *Power Quality Aspects of Solar Power*
- VDE/FNN Expertennetzwerk *Netzurückwirkungen*
- D-A-CH-CZ Arbeitsgruppe *EMV* (Technische Regeln zur Beurteilung von Netzurückwirkungen)
- DKE/UK 767.1 *Niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen* (Gastmitglied)
- CENELEC SC205A TF EMI *Electromagnetic Interferences between Electrical Equipment/Systems in the Frequency Range below 150 kHz*

Dr.-Ing. Jörg Meyer

- ETG/ITG Taskforce: *Schutz- und Automatisierungstechnik in aktiven Energie-Verteilungsnetzen*

Dipl.-Ing. Sascha Müller

- Jungmitgliederreferent VDE Dresden

Dipl.-Ing. Sebastian Palm

- ETG/ITG Taskforce: *Schutz- und Automatisierungstechnik in aktiven Energie-Verteilungsnetzen*

Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner

- VDE (ETG) Task Force *Grundsätzliche Auslegung Neuer Netze* (Vorsitzender)
- CIGRÉ 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)
- VDE Dresden Arbeitskreis: Relais- und Schutztechnik
- Energy Saxony Mitglied im Arbeitskreis *Speicher und Netzdienstleistungen*
- Gesellschaft von Freunden und Förderern der Technischen Universität Dresden e. V.
- Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e. V.

Dipl.-Ing. Jens Werner

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

#### 4.4.2 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 - Principles to measure the AC and DC resistance of conductors
- Kuratorium AIESEC Dresden e. V.
- Kuratorium Fraunhofer IPMS Dresden
- VDE (ETG) Task Force *Perspektiven der Übertragungstechnik*

Dipl.-Ing. Maria Hering

- CIGRÉ WG D1.51 *Dielectric performance of eco-friendly gas insulated systems*
- CIGRÉ WG D1.63 *Partial discharge detection under DC stress*
- CIGRÉ JWG D1/B3.57 *Dielectric Testing of gas-insulated HVDC Systems*
- VDE (ETG) FB Q2 *Werkstoffe, Isoliersysteme und Diagnostik*
- Gleichstellungsbeauftragte der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik, TU Dresden
  - Mitglied im Fakultätsrat der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
  - Mitglied in der Senatskommission Wissenschaftlicher Nachwuchs
  - Mitglied in der Senatskommission Gleichstellung und Diversity

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

Dr.-Ing. Stephan Schlegel

- Arbeitskreis *Revision der IEC 61238-1: Compression and mechanical connectors for power cables for rated voltages up to 36 kV (Um = 42 kV) - Part 1: Test methods and requirements*

## 5 Veranstaltungen

### „Power“ - Grill am 06.05.2015

Im Rahmen des „Power“ - Grillens hinter der Hochspannungshalle nutzten auch 2015 wieder zahlreiche Studierende die Gelegenheit zum Gespräch mit den Hochschullehrern sowie Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Elektrotechnischen Instituts (ETI) und des Instituts für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik (IEEH). Den interessierten, angehenden Ingenieurinnen und Ingenieuren bot sich die Möglichkeit, mehr über die Vertiefungsrichtung Elektroenergie-technik 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 am 03.07.2015

Im Rahmen der Vorlesung Elektroanlagenprojektierung findet regelmäßig eine Exkursion in ein Umspannwerk des städtischen Energieversorgers der DREWAG statt. Die diesjährige Besichtigung fand am 03.07.2015 statt. Besichtigt wurde das 110/20/10 kV Umspannwerk Dresden-Räcknitz. 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

## „Dresdner Kreis 2015“ am 25. und 26.03.2015

Am 25. und 26.03.2015 fand das 16. Treffen zum Dresdner Kreis an der Leibniz Universität Hannover statt. Beginnend am frühen Nachmittag wurden am ersten Tag in zwei Vortragsreihen jeweils vier Themen aus den aktuellen Forschungsbereichen der teilnehmenden Institute präsentiert. Die präsentierten Forschungsthemen – aus den unterschiedlichsten Bereichen der Elektroenergieversorgungstechnik – bildeten die Grundlage für die anschließende fachliche Diskussion.

Zum Ausklang des ersten Tages folgte am Abend ein gemeinsames Abendessen in einem chinesischen Restaurant im Gewölbekeller des alten Rathauses. Nach dem Abendessen gab es noch die Möglichkeit an einer Nachtwächterführung durch die Altstadt von Hannover teilzunehmen, die auch von vielen Teilnehmern mit großem Interesse angenommen wurde.

Am zweiten Tag folgte eine Werksbesichtigung bei Nexans, dem führenden Anbieter für Kabel. Hier wurden nach einer kurzen theoretischen Einführung in die Produktionsabläufe der Kabelherstellung die einzelnen Fertigungsprozesse im Rahmen einer Werksführung präsentiert. Für ein besonderes Interesse sorgte die aktuelle Produktion von Seekabeln.



Gruppenfoto des Dresdner Kreises im Neuen Rathaus Hannover

## VDE Exkursion Elektroenergietechnik 26.05. - 29.05.2015

Die Pfingstexkursion des VDE Bezirksvereins Dresden wurde in diesem Jahr von der Professur für Elektroenergieversorgung organisiert und bot Studenten der TU Dresden und der Hochschule Zittau/Görlitz einen praxisnahen Einblick in Unternehmen der Energietechnik. Die insgesamt 21 Studierenden wurden von den Hochschullehrern Prof. Schegner und Prof. Schmidt begleitet. Das Ziel der Exkursion war in diesem Jahr der Großraum Düsseldorf/Köln, in dem sieben Firmen der Energieversorgung und des Elektromaschinenbaus besucht wurden. Neben der Fertigung und Prüfung verschiedenster elektroenergie-technischer Komponenten, wie z. B. von Großtransformatoren, Energiekabeln oder Vakuum-Leistungsschaltern, konnten die Studenten ebenfalls den Braunkohletagebau Hambach im rheinischen Revier und die RWE-Gasspeicheranlage in Staßfurt kennenlernen. Besonderer Dank gilt den Unternehmen für den freundlichen Empfang und die sehr interessanten Führungen:

Nexans Deutschland GmbH in Hannover, Alstom Grid GmbH in Mönchengladbach, RWE Power AG in Niederrhein, ABB AG in Ratingen, Siemens AG in Mülheim an der Ruhr und RWE Gasspeicher GmbH in Staßfurt.

Der vertiefende Austausch über fachliche als auch fachfremde Themen erfolgte beim gemütlichen Zusammensein mit Vertretern der lokalen VDE-Hochschulgruppen. In Düsseldorf empfing uns die örtliche Hochschulgruppe in einem Düsseldorfer Brauhaus auf ein Glas Altbier, während die Kölner Hochschulgruppe mit uns eine interessante Führung durch die Kölner Altstadt unternahm. Trotz des gut gefüllten Terminplans blieb dennoch ausreichend Zeit für ein individuelles Erkunden der Düsseldorfer Innenstadt, in der ebenfalls unsere Jugendherberge ansässig war.



Besuch im Tagebau Hambach

Foto: Sascha Müller

## 7. REWE Teamchallenge

Am 03.06.2015 um 19:30 Uhr startete in Dresden am Altmarkt die 7. REWE Teamchallenge mit insgesamt über 13500 Teilnehmern. Bei diesem Firmenlauf über eine Strecke von 5 km treten die Läufer in Teams zu je vier Personen gegeneinander an. Auch in diesem Jahr stellte unser Institut wieder vier Teams, darunter ein Frauenteam. Am schnellsten waren die „EV-Flitzpiepen“, sie erreichten in der Teamwertung den 29. Platz. Vor allem aber hat es allen sehr viel Spaß gemacht, wie auf den Fotos zu sehen ist.



Vor dem Lauf



Nach dem Lauf  
IEEH-Teilnehmer der Team-Challenge

---

## Assistentenfahrt der Professur für Hochspannungs- und Hochstromtechnik nach Merseburg und Halle (Saale) vom 05.06. - 07.06.2015

Gemäß der seit Jahren gelebten Tradition am Lehrstuhl für Hochspannungs- und Hochstromtechnik wurde auch dieses Jahr wieder für ein Wochenende die Heimat eines wissenschaftlichen Mitarbeiters genauer unter die Lupe genommen. Dieses Mal verschlug es die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter mit ihren Familien in die „Salzstadt“ Halle an der Saale und in die 18 km entfernte Stadt Merseburg.

Nach der Ankunft aller Teilnehmer in der Pension in Merseburg am Südpark begann der Freitagabend mit einem gemeinsamen Spaziergang zum Gasthof „Merseburger Raben“, wo sich alle mit deftiger Hausmannskost für die abendliche Stadtführung durch Merseburg mit der Laternenrese stärken konnten.

Am darauffolgenden Tag ging es mit der Bahn in die Hallesche Innenstadt. Nach einem Blick auf die geologische Besonderheit der Halleschen Marktplatzverwerfung, stand zuerst ein individuelles Erkunden der Stadt auf dem Plan. Viele Teilnehmer besuchten das Technische Halloren- und Salinemuseum, um sich über das, im Mittelalter auch als weißes Gold bezeichnete Salz, seine Gewinnung und Herstellung in Halle zu informieren. Das aus heutiger Sicht wohl bekannteste Produkt aus Halle, die Halloren-Kugel, konnte dann am Nachmittag bei einer Führung durch die Halloren-Schokoladenfabrik näher betrachtet und vor allem auch verkostet werden. Zurück in Merseburg wurde dann der Abend gemeinsam in „Ritters Weinstuben“ mit einem vorzüglichen Menü und gutem Wein zum Ausklang gebracht.



Merseburger Dom



Marktplatz Halle



Luftfahrt- und Technik-Museumspark

Am Sonntag besuchten wir den Luftfahrt- und Technik-Museumspark Merseburg, wo neben vielen Exponaten aus dem Bereich Haushalts- und Fahrzeugtechnik berühmte Flugzeuge wie die IL14, die TU134 und die IL62 von außen wie auch von innen besichtigt werden konnten. Im Anschluss konnten sich die Teilnehmer am Sonntagmittag im „Bootshaus Merseburg“ direkt an der Saale noch für die Heimreise stärken.

## BDEW Kongress 23. - 25.6.2015

Der Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) lädt jedes Jahr zum Jahreskongress in Berlin, auf dem aktuelle Themen der Branche diskutiert werden. Prominente Vertreter aus Politik und Wirtschaft stellen dabei mit ihren Gastreden die Eckpfeiler des Programms auf, dass durch eine Fachmesse begleitet wird. In diesem Jahr waren der Bundesminister für Wirtschaft und Energie, Sigmar Gabriel, und Joe Kaeser (Aufsichtsratsvorsitzender Siemens) die Hauptredner.



Teilnehmer der Nachwuchsinitiative

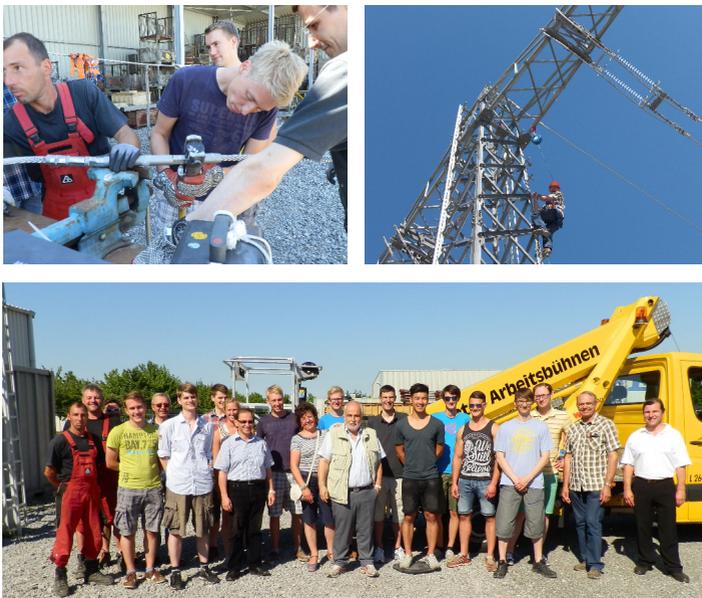
Quelle Bild: Foto © EW Medien

Im Rahmen einer Nachwuchsinitiative ermöglicht es der Bundesverband zusammen mit Sponsoren jedes Jahr mehr als 100 Studenten und Berufseinsteigern am Kongress teilzunehmen. Julien Heger und Toni Israel nahmen stellvertretend für das IEEH am Kongress teil. In Vorbereitung fand in den Räumen der KPMG/CTG in Berlin am 19./20.5.2015 ein Zukunftsworkshop für 12 Teilnehmer statt. Hierbei entstanden ein Video und ein Kunstwerk, das eine Vision für den Energiemarkt und die Gesellschaft im Jahr 2035 wieder spiegelt. Der Workshop war durch die kreative Atmosphäre der anwesenden Künstler und Scriptmakers geprägt. In den 3 Kongresstagen der Hauptveranstaltung sind besonders die persönlichen Gespräche mit Managern von Siemens, Alstom, ABB und KPMG im Gedächtnis geblieben, die einen Einblick in die sonst eher verschlossene Branche gaben.

## Exkursion zum Trainings- und Schulungszentrum für HS-Freileitungsbau der Firma Omexom in Korbußen am 01.07.2015

Zum Abschluss der Vorlesungsreihe „Ausgewählte Kapitel der elektrischen Energietechnik“ führte eine Exkursion interessierte Studenten und Mitarbeiter in das Trainings- und Schulungszentrum für Hochspannungs-Freileitungsbau der Firma Omexom Hochspannung GmbH (ehemals GA Hochspannung Leitungsbau GmbH) nach Korbußen (Thüringen). Die Exkursion fand in diesem Jahr aufgrund der positiven Resonanz zum zweiten Mal statt und wurde erneut von Herrn Dr.-Ing. habil. K. Papailiou organisiert und begleitet, als Gastdozent der Vorlesungsreihe die Aspekte des Planens und Berechnens von Freileitungen vermittelt.

Bei bestem Wetter begaben sich die Teilnehmer mit dem Bus auf den Weg nach Korbußen. Nach der Ankunft und der herzlichen Begrüßung durch das Team des Schulungszentrums wurden das Unternehmen sowie das Trainings- und Schulungszentrum vorgestellt. Anschließend konnten die Teilnehmer an verschiedenen Stationen ausgewählte Arbeitsabläufe üben, wie das Montieren von Doppel-Trag- und Abspannketten sowie einer Spiralarmatur oder das Herstellen einer Pressverbindung. Zudem konnte das nötige Sicherungsequipment zum Besteigen eines Freileitungsmastes begutachtet und ausprobiert werden. Der erlebnisreiche Tag endete mit einem besonderen Dank an die Gastgeber und den Organisator, bevor die Teilnehmer die Rückreise antraten.



Eindrücke der Exkursion

## 23. Kolloquium Hochspannungs- und Anlagentechnik: 16.07. – 18.07.2015 in Darmstadt

Der diesjährige „Darmstädter Kreis“ kehrte wieder an seinen Ursprung zurück, denn das Fachgebiet Hochspannungstechnik der TU Darmstadt lud die Partnerlehrstühle aus Ilmenau, München, Zittau/Görlitz und Dresden in ihre heiligen Hallen ein.

Im Zentrum der Veranstaltung standen die Fachvorträge zur Vorstellung aktueller Forschungsschwerpunkte der Hochspannungs- und Hochstromtechnik mit anschließender Diskussion. Die Themen umfassten dabei das Gebiet der festen und gasförmigen Isolierstoffe, der Schaltgeräte, der Auswirkungen hochfrequenter Spannungen sowie das Gebiet der elektrischen Kontakte und Verbindungen. Nach der Begrüßung durch den Leiter des Fachgebietes, Prof. Dr.-Ing. V. Hinrichsen, richtete sich auch der Initiator des Kolloquiums, Herr Prof. Dr.-Ing. D. König, noch einmal an das Auditorium.

Auch das Rahmenprogramm der Veranstaltung ließ keine Wünsche offen. Bei einer Führung durch die „Grohe“ Brauerei konnten sich die Teilnehmer bei einer anschließenden deftigen Mahlzeit und bestem Biergartenwetter stärken. Eine Exkursion durch die Wartungshallen der Lufthansa-Technik am Flughafen in Frankfurt a. M. lieferte zudem interessante Einblicke in den Luftverkehr. Nach dem abendlichen Institutsrundgang konnten beim abschließenden gemütlichen Grillabend auch Themen abseits der Forschung diskutiert und Kontakte geknüpft und gepflegt werden. Traditionsgemäß wurden auch wieder lokale Aufmerksamkeiten als Dankeschön an die Gastgeber überreicht.



Besichtigung der „Grohe“ Brauerei in Darmstadt



Exkursion zu Lufthansa im Flughafen Frankfurt



Übergabe des Gastgeschenks

## The 10th International Conference on Electric Fuses and their Applications

Vertreter aus Industrie und Forschung auf dem Gebiet der Schmelzsicherungen und deren Anwendung trafen sich in diesem Jahr vom 14. bis 16. September auf der 10th International Conference on Electric Fuses and their Applications (ICEFA) in Dresden. Gastgeber war in diesem Jahr die Technische Universität Dresden unter Schirmherrschaft von Prof. Dr.-Ing. S. Großmann. Dresden ist seit der ersten Veranstaltung in den siebziger Jahren erst der zweite Ort in Deutschland, an dem diese vermutlich wichtigste Fachveranstaltung im Bereich der Sicherungstechnik als Plattform für den Informationsaustausch zwischen Wissenschaftlern stattfand.

Neue Anwendungsgebiete und veränderte Einsatzbedingungen von Sicherungen, speziell im Bereich regenerativer Energieerzeugung, Elektromobilität und moderner Energieversorgungsnetze stellten dabei die großen Themenschwerpunkte der diesjährigen Veranstaltung dar. Dabei wurden insgesamt 23 wissenschaftliche Beiträge aus 12 Ländern in Vorträgen zu den Themenschwerpunkten Störllichtbogen, Entwicklung, Gleichspannungsanwendungen, neue und herausfordernde Anwendungsgebiete, Standardisierung sowie Modellierung und Simulation vorgestellt und diskutiert.

Neben den wissenschaftlichen Beiträgen hatten die Teilnehmer die Möglichkeit, in mehreren Rahmenveranstaltungen Dresdens Umland und die historische Altstadt zu erkunden.



Begrüßung zur ICEFA 2015 in Dresden



Abendveranstaltung auf der Elbe mit einem historischen Schaufelraddampfer



Übergabe eines Lernzirkelwagens des NH/HH-Recyclingvereins als Geschenk an die TU Dresden

## Tag der Fakultät 2015

Am 2. Oktober 2015 fand zum 20. Mal der Tag der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik statt. Anlässlich des Jubiläums wurde das Programm der Veranstaltung erweitert. Nach dem Festvortrag „Virtual Reality in Restaurierung, Produktentwicklung und Design“ wurden die Alumni des vergangenen Jahres verabschiedet und hervorragende Studien- und Promotionsleistungen ausgezeichnet. Der Weg führte anschließend in die Hochspannungshalle des Instituts für Energieversorgung und Hochspannungstechnik. Im Rahmen einer Posterausstellung und bei verschiedenen Fachvorträgen präsentierten die Professuren der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik einen Einblick in ihre Arbeit. Dabei informierte auch unser Institut die interessierten Zuhörer mit sechs spannenden Vorträgen zu aktuellen Forschungsthemen in den Bereichen Elektroenergieversorgung sowie Hochspannungs- und Hochstromtechnik. Mit einem Grillbuffet und Musik von der Sunshine Dixieland Band klang der Abend schwungvoll aus.



Posterausstellung in der Hochspannungshalle

Foto: Arne Sonnenburg

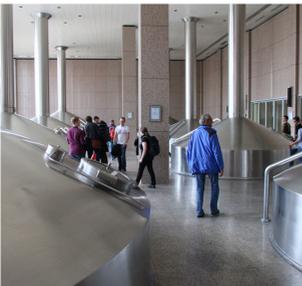
## Projekttag am 25. September 2015 in Radeberg

In diesem Jahr besuchten wir während des Projekttages die schöne Stadt Radeberg. Am Bahnhof in Radeberg angekommen, wurden wir von Bierkutscher Ernst in Empfang genommen, der uns zu Fuß durch die Stadt führte und uns über seinen Beruf selbst, aber auch Geschichten rund ums Bierbrauen in Radeberg berichtete. So war es zum Beispiel am Anfang des Jahrhunderts jedem, der ein Haus in Radeberg besaß, auch erlaubt, Bier zu brauen. Dabei gab es wohl manche Experimente mit wilden, teilweise unbedenklichen Kräutern. Auch Sehenswürdigkeiten wie den Marktplatz, Schloss Klippenstein oder die Stadtkirche haben wir uns angeschaut.



Mit Bierkutscher Ernst unterwegs in Radeberg

Anschließend war nach vielen Bier- und Braugeschichten vor allem die Besichtigung der 1872 gegründeten Radeberger Exportbierbrauerei ein ersehntes Highlight. Dort haben wir „fast“ alle Geheimnisse des Bierbrauens erfahren dürfen: vom Korn über die Hefe und den Hopfen bis hin zum Wasser nur die besten Zutaten.

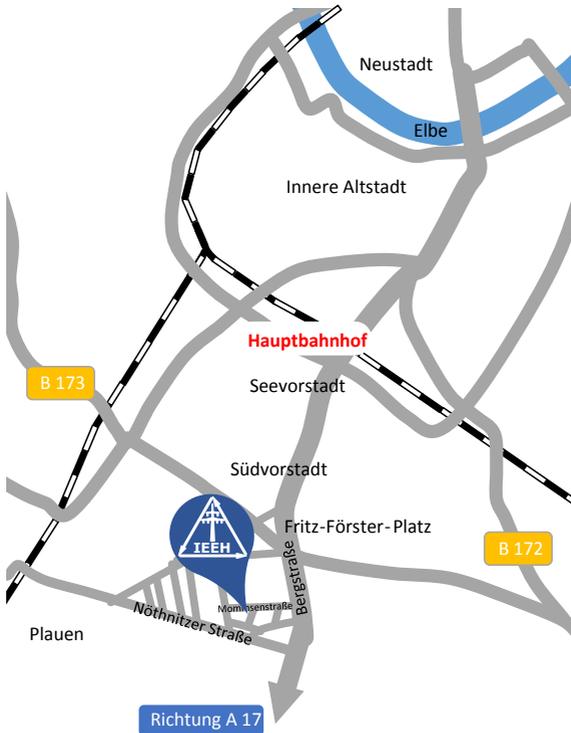


Modernste Technik im Sud- und im Kesselhaus

Außerdem wurde und wird in der Radeberger Exportbierbrauerei nur eine einzige Biersorte gebraut, nämlich das Radeberger Pilsner. Im Anschluss durfte natürlich eine kleine Bierverskostung nicht fehlen. Bei einem Essen im Brauereiausgang konnte der Tag dann gemütlich ausklingen.

# 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).