TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

Jahresbericht 2016

Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik



Vorwort

Sehr geehrte Freunde des Instituts für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik,

auch in diesem Jahr wollen wir Sie mit dem Jahresbericht 2016 über wichtige Ereignisse und Aktivitäten am Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik (IEEH) informieren. Wir können wieder auf eine erfolgreiche Arbeit in Lehre und Forschung zurückblicken.
Wie im vorangegangenen Jahresbericht dargestellt, hat sich der Rektor der Technischen Universität Dresden Herr Prof. Hans Müller-Steinhagen auf die Umsetzung der eingeleiteten organisatorischen Veränderungen an der TU Dresden konzentriert, hierzu zählt unter anderem die Bereichsbildung.
Die intensive Diskussion über die zukünftige Ausgestaltung der Exzellenzinitiative auf politischer Ebene führte zu einer inhaltlichen Neuausrichtung und einer Verschiebung der Bewerbungsfristen. Hierdurch mussten die bereits im letzten Jahr angelaufenen Aktivitäten an der Technischen Universität neu ausgerichtet werden.
Das zentrale Thema auf dem Gebiet der Energietechnik war auch im letzten Jahr die Energiewende. Die elektrische Energieversorgung durchläuft grundlegende Veränderungen, welche einerseits die Netzstrukturen auf Transport- und Verteilungsnetzebene und andererseits die Komponenten des elektrischen Versorgungssystems betreffen. Die immer höheren betriebs- und umgebungsbedingten Belastungen betreffen praktisch alle elektrotechnischen Betriebsmittel. Daher werden einerseits Maßnahmen untersucht, um die Belastbarkeit der Betriebsmittel zu erhöhen, zum Beispiel durch den Einsatz von Hochtemperaturleiterseilen. Andererseits wird angestrebt, durch eine optimierte und koordinierte Steuerung von Verbrauch, Speicherung und Energiebereitstellung maximale Belastungsgrenzen nicht zu überschreiten. In diesem Zusammenhang rückt die spartenübergreifende Bewertung der Energieversorgung, das heißt die gemeinsame Betrachtung des elektrischen Energieversorgungssystems, der Gas- und Wärmeversorgung, immer mehr in den Fokus. Die genannten Themenfelder werden am IEEH in verschiedenen Projekten behandelt.
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. Details hierzu können Sie den Forschungskurzberichten der wissenschaftlichen Mitarbeiter entnehmen.
In den Räumen des Instituts (Toeplerbau Sockelgeschoss und Binderbau) sind die Baumaßnahmen weiter vorangeschritten, leider sind diese jedoch immer noch nicht vollständig abgeschlossen. Ohne die tatkräftige Unterstützung unserer

Werkstattmitarbeiter wäre dies nicht möglich gewesen, hierfür danken wir ihnen besonders. Wir hoffen, dass die Ausführung von Restarbeiten und das Beseitigen von Mängeln bis Anfang 2017 abgeschlossen sind.
Die Absolventen der elektrischen Energietechnik rekrutieren sich im Wesentlichen durch die Studierenden in den Studiengängen „Elektrotechnik" und „Regenerative Energiesysteme". Die Anzahl der Studienanfänger ist in den genannten Studiengängen leicht rückläufig. Es ist zu erwarten, dass dies mittelfristig wieder zu einer Reduktion der Absolventen in der elektrischen Energietechnik führen wird.
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, Herrn Dr. Sergey Gortschakow 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, wie in jedem Jahr, den ehemaligen Mitarbeitern unseres Instituts, Doz. Dr. Hartmut Bauer, Dr. Eberhard Engelmann, PD Dr. Helmut Löbl und Prof. Gert Winkler. Sie haben uns im letzten Jahr wieder mit Rat und Tat unterstützt.
Herr Dr.-Ing. Nils Lücke und Herr Dr.-Ing. Jörg Dickert haben nach mehrjähriger Tätigkeit als Teamleiter für die Forschungsgruppen „Bewegliche Kontakte und Verbindungen" bzw. „Planung und Betrieb" unser Institut planmäßig verlassen. Für ihr großes Engagement in Forschung und Lehre bedanken wir uns ganz herzlich und wünschen ihnen für die Zukunft alles Gute.
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 wünschen Ihnen ein gesundes, erfolgreiches und frohes Jahr 2017 und freuen uns auf eine weiterhin gute Zusammenarbeit.

Dresden, Dezember 2016



Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner



Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann

Inhaltsverzeichnis

1 Personelle Besetzung 4
1.1 Lehrstuhl Elektroenergieversorgung 4
1.2 Lehrstuhl Hochspannungs- und Hochstromtechnik 6
1.3 Labor und Werkstatt 8

2 Lehre 9
2.1 Lehrveranstaltungen 9
2.1.1 Lehrveranstaltungen für das Grundstudium 9
2.1.2 Lehrveranstaltungen für das Hauptstudium 9
2.1.3 Lehrexport an andere Fakultäten – Grundstudium 11
2.2 Studentische Arbeiten 12
2.2.1 Studienarbeiten und Forschungspraktika 12
2.2.2 Diplom- und Masterarbeiten 14

3 Forschung 18
3.1 Lehrstuhl Elektroenergieversorgung 18
3.1.1 Forschungsschwerpunkte und Forschungsprojekte 18
3.1.2 Publikationen 68
3.2 Lehrstuhl Hochspannungs- und Hochstromtechnik 78
3.2.1 Forschungsschwerpunkte und Forschungsprojekte 78
3.2.2 Publikationen 112
3.3 Preise und Auszeichnungen 115
3.4 Promotionen 119

4 Kooperationen 126
4.1 Wissenschaftskooperationen 126
4.2 Industriekooperationen 128
4.3 Kommissions- und Gremienarbeit 130
4.3.1 Lehrstuhl Elektroenergieversorgung 130
4.3.2 Lehrstuhl Hochspannungs- und Hochstromtechnik 132

5 Veranstaltungen 134

Titelbild: Netzanschluss des Kraftwerks *Hoover Dam*

Foto: Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner

1 Personelle Besetzung

1.1 Lehrstuhl Elektroenergieversorgung

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

Titel	Nachname	Vorname	Telefon (0351-463-)
	Wissenschaftliche Mitarbeiter		
Dr.-Ing.	Dickert	Jörg	(bis 10/2016)
Dr.-Ing.	Domagk	Max	35223
Dipl.-Ing.	Erdmann	Niels	43203
Dipl.-Ing.	Frowein	Karla	37869
Dipl.-Ing.	Gasch	Etienne	43206
	Gupta	Manish	(05/2016 bis 07/2016)
Dipl.-Ing.	Heß	Tobias	32941
M.Sc.	Jäschke	Christian	35353
Dipl.-Ing.	Klatt	Matthias	43207
Dipl.-Ing.	Krahmer	Sebastian	39993
Dipl.-Ing.	Kreutziger	Marcus	43202
Dipl.-Ing.	Liebermann	Carlo	43204
Dipl.-Ing.	Ma	Liya	43080
Dipl.-Ing.	Möller	Friedemann	43209
Dipl.-Ing.	Müller	Sascha	43210
B.Eng.	Caicedo Navarro	Joaquin Eduardo	(07/2016 bis 12/2016)
M.Sc.	Nilges	Matthias	40438
Dipl.-Ing.	Palm	Sebastian	33094
M.Sc.	Pourarab	Morteza	
Dipl.-Ing.	Schmidt	Maximilian	43081
Dipl.-Ing.	Schnelle	Tobias	33725
Dipl.-Ing.	Schubert	Uwe	(bis 09/2016)
Dipl.-Ing.	Stiegler	Robert	32217
Dipl.-Ing.	Ungethüm	Stefan	(bis 07/2016)
M.Sc.	Wenzlaff	Karsten	43200
Dipl.-Ing.	Werner	Jens	33086
M.Eng.	Zyabkina	Olga	40535

1.2 Lehrstuhl Hochspannungs- und Hochstromtechnik

Titel	Nachname	Vorname	Telefon (0351-463-)
	Leiter der Professur		
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		
Dipl.-Ing.	Dietrich	Thomas	
Dr.-Ing.	Fiebig	Reiner	
Dr.-Ing.	Fricke	Winfried	
Dr.	Gortschakow	Sergey	
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	(bis 05/2016)
	Wissenschaftliche Mitarbeiter		
Dipl.-Ing.	Adam	Robert	34789
Dr.-Ing.	Backhaus	Karsten	33608

Titel	Nachname	Vorname	Telefon (0351-463-)
	Wissenschaftliche Mitarbeiter		
M.Eng.	Bakka	Maher	34948
Dr.-Ing.	Baumann	Matthias	33080
Dipl.-Ing.	Bäuml	Katrin	(extern)
Dr.-Ing.	Dreier-Schmidt	Sebastian	(bis 02/2016)
Dipl.-Ing.	Fuhrmann	Torsten	34756
Dipl.-Ing.	Gabler	Tobias	40518
Dr.-Ing.	Gatzsche	Michael	34756
Dipl.-Ing.	Götz	Thomas	40519
Dipl.-Ing.	Heger	Julian	34789
M.Sc.	Helal	Khaled Arafa Aly	40520
Dr.-Ing.	Hering	Maria	(bis 03/2016)
Dipl.-Ing.	Hildmann	Christian	33917
Dipl.-Ing.	Israel	Toni	34756
Dipl.-Ing.	Kühnel	Christian	40516
Dr.-Ing.	Lücke	Nils	(bis 09/2016)
Dipl.-Ing.	Oberst	Marcella	39982
Dipl.-Ing.	Pampel	Hans-Peter	33103
Dr.-Ing.	Pfeifer	Stephanie	39982
Dipl.-Ing.	Ramonat	Alexander	40517
Dr.-Ing.	Schlegel	Stephan	32746
Dipl.-Ing.	Voigt	Matthias	33080
	Technische Angestellte		
Dipl.-Ing. (FH)	Göres	Axel	32613

1.3 Labor und Werkstatt

Nachname	Vorname	Telefon (0351-463-)
Dittrich	Ralf	34745
Eusewig	Falk	33516
Gläser	Michael	34757
Jarosczinsky	Gerd	34745
Knüpfel	Helge	34260
Reichelt	Eric	34745
Wermuth	Peter	33516

2 Lehre

2.1 Lehrveranstaltungen

2.1.1 Lehrveranstaltungen für das Grundstudium

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

2.1.2 Lehrveranstaltungen für das Hauptstudium

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

Vorlesungen / Übungen / Praktika	SS	WS
Modul Oberseminar Elektrische Energieversorgung		
Oberseminar Elektrische Energieversorgung *Prof. Schegner/ Prof. Großmann*		0/2/0
Modul Systemverhalten und Versorgungsqualität elektrischer Energieversorgungssysteme		
Betriebsvorgänge in Energieversorgungssystemen *Prof. Schegner*	2/1/0	
Versorgungsqualität *Prof. Schegner/ Dr. Jan Meyer*	1/1/0	
Komplexpraktikum zum Netzbetrieb	0/0/1	
Modul Planung elektrischer Energieversorgungssysteme		
Netzplanung *Prof. Schegner/ Dr. Hable*	1/1/0	
Elektroenergieanlagenprojektierung *Prof. Schegner/ Prof. Hentschel*	1/1/0	
Netzberechnung *Prof. Schegner*	2/2/0	
Modul Vertiefung Hochspannungstechnik		
Vertiefung Hochspannungstechnik *Prof. Großmann/ Dr. Speck*	5/0/0	
Praktikum Vertiefung Hochspannungstechnik	0/0/1	
Modul Beanspruchung elektrischer Betriebsmittel		
Beanspruchung elektrischer Betriebsmittel *Prof. Großmann/ Dr. Schlegel/ Dr. Lücke/ Dipl.-Ing. Adam*		3/0/0
Beleg Geräte der Energietechnik *Prof. Großmann*		0/1/0
Praktikum Beanspruchung elektrischer Betriebsmittel		0/0/2

Vorlesungen / Übungen / Praktika	SS	WS
Modul Schutz- und Leittechnik in elektrischen Energieversorgungssystemen		
Selektivschutztechnik *Prof. Schegner/ Dr. Jörg Meyer*		2/1/0
Leittechnik *Prof. Schegner/ Dipl.-Ing. Schindler*		1/1/0
Praktikum Sekundärtechnik		0/0/1
Modul Experimentelle Hochspannungstechnik		
Experimentelle Hochspannungstechnik *Prof. Großmann/ Dr. Speck*		4/0/0
Praktikum Experimentelle Hochspannungstechnik		0/0/2
Weitere Vertiefungsfächer		
Elektrische Lasten und Lastmanagement *Prof. Schegner*		1/1/0
Ausgewählte Kapitel der Elektrischen Energietechnik		
Freileitungsbau Hochspannungsgeräteentwicklung *Prof. Großmann/ Dr. Papailiou/ Gastdozenten*		2/1/0
Elektrosicherheit und Versorgungszuverlässigkeit *Doz. Dr. Bauer*	2/1/0	

2.1.3 Lehrexport an andere Fakultäten – Grundstudium

Vorlesungen / Übungen / Praktika	SS	WS
Hochspannungs- und Hochstromtechnik (für Wirtschaftsingenieure) *Prof. Großmann*		2/1/1
Grundlagen der Elektrotechnik für den Maschinenbau *Prof. Großmann*		2/1/0
Elektrotechnische Systeme im Maschinenbau *Prof. Großmann*		2/1/0
Elektrotechnik (für die Fakultät Maschinenwesen) *Prof. Großmann*		2/2/0

2.2 Studentische Arbeiten

2.2.1 Studienarbeiten und Forschungspraktika

Fey, Tobias
Untersuchungen zur elektrischen Festigkeit ultrahochfesten Betons
24/2014 (Betreuer: M.Sc. Bakka)

Gao, Xiao
Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit von ultrahochfestem Beton
25/2014 (Betreuer: M.Sc. Bakka)

Schröder, Steffen
Untersuchungen zum Herstellen elektrischer Verbindungen mit zylindrischen Aluminiumleitern im Pressverband
04/2015 (Betreuer: Dipl.-Ing. Ramonat)

Koopmann, Manuel
Erarbeiten einer Methode zum Messen des Widerstandes einer Schraube-Mutter-Anordnung
06/2015 (Betreuer: Dr.-Ing. Pfeifer)

Riebisch, Andreas
Verfahren zur Identifikation des spannungs- und frequenzabhängigen Lastverhaltens von Verbrauchern durch die Auswertung von Ereignissen in elektrischen Netzen
08/2015 (Betreuer: Dipl.-Ing. Palm)

Mielke, Jonas
Berechnung und Bewertung der Sichtbarkeit von Freileitungsmasten mittels Geoinformationssystem
09/2015 (Betreuer: Dipl.-Ing. Erdmann)

Kietz, Henrike
Entwurf von Regelungen für den Betrieb von elektrischen Inselnetzen
10/2015 (Betreuer: Dipl.-Ing. Palm)

Oberst, Marcella
Untersuchen des Langzeitverhaltens stromtragender Verbindungen mit gepressten Aluminium-Kabelschuhen und feindrähtigen Leitern aus Aluminium sowie Stromschienen aus Kupfer
11/2015 (Betreuer: Dr.-Ing. Lücke/Dr.-Ing. Schlegel)

Li, Kai
Erweiterung der Regelung einer leistungselektronischen Netzkupplung für den unsymmetrischen Normalbetrieb und zur Kompensation von Oberschwingungen
14/2015 (Betreuer: Dipl.-Ing. Schnelle)

Raue, Henriette
Einfluss der EEG-Einspeisungs auf die Baseload-, Dayhead- und Interdaypreise der EPEX
15/2015 (Betreuer: Dipl.-Ing. Heß)

Schilbach, Marcel
Grundlegende Untersuchung zu Zwischensystemfehlern
18/2015 (Betreuer: Dr.-Ing. Jörg Meyer)

Schöbe, Martin
Ausarbeitung neuer Planungskennzahlen für Niederspannungsnetze unter Verwendung von synthetischen Lastgängen
19/2015 (Betreuer: Dr.-Ing. Dickert)

Yan, Yan
Analyse und Vergleich des Einflusses verschiedener Photovoltaik-Wechselrichter auf die Elektroenergiequalität anhand von Netzmessungen
20/2015 (Betreuer: Dipl.-Ing. Möller)

Bauer, Michael
Eignungsuntersuchung verschiedener Strommessverfahren zur Messung der Leitfähigkeit bei Gleichspannungsbelastung
01/2016 (Betreuer: Dr.-Ing. Backhaus)

Hauschild, Sebastian
Anweisung für die Berechnung von Einstelldaten von Distanzschutzgeräten zum Schutz gemischter Kabel-Freileitungsstrecken
03/2016 (Betreuer: Dr. Jörg Meyer)

Werner, Sarah-Anne Christin
Aktueller Forschungsstand zu „Hybriden Energiekabeln"
04/2016 (Betreuer: Dipl.-Ing. Erdmann)

Li, Yan
Literaturrecherche zu Home-Automation-Systemen (HAS) und Entwurf einer Testumgebung
05/2016 (Betreuer: Dipl.-Ing. Werner)

2.2.2 Diplom- und Masterarbeiten

Haase, Tommy
Untersuchungen zum elektrischen Kontaktverhalten von stromführenden Armaturen für Freileitungsseile
04/2015 (Betreuer: Dipl.-Ing. Hildmann)

Hütter, Jan
Implementierung und Bewertung von Zustandsidentifikations-Methoden für Verteilnetze
10/2015 (Betreuer: Dipl.-Ing. Schmidt)

Liu, Ying
Berechnung der Verlagerungsspannung in 110-kV-Netzen in Abhängigkeit der Leitungs- und Netzparameter
12/2015 (Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Schegner/Prof. Dr.-Ing. Schmidt)

Begoll, Romano
Aufbau und Inbetriebnahme des Versuchsstandes und Durchführung von Niederspannungsstörlichtbogenversuchen
12/2015 (Betreuer: M.Sc. Wenzlaff)

Brunne, Alexander
Simulation und Parameterstudie zum Auftreten von ausbleibenden Stromnulldurchgängen beim Einschalten von kompensierten Kabelstrecken
13/2015 (Betreuer: Dr.-Ing. Jörg Meyer)

Backmann, Gerrit
Signaltheoretische Untersuchung von Distanzschutzalgorithmen zur schnellen Störlichtbogendetektion
14/2015 (Betreuer: M.Sc. Wenzlaff)

Yin, Chuanfei
Entwicklung eines Modellansatzes für die Grund- und Oberschwingungsstromemission von Haushalten
15/2015 (Betreuer: M.Eng. Blanco)

Pietsch, Hannes
Untersuchungen zum Verhalten fester Störstellen auf realen Isolatoren im Vergleich zu Modellisolatoren in gasisolierten Gleichspannungssystemen
16/2015 (Betreuer: Dr.-Ing. Hering)

Li, Qingchen
Berechnung von Netzverlusten in Niederspannungsnetzen bei Verwendung von Lastgängen unter Berücksichtigung von Unsymmetrien
17/2015 (Betreuer: Dr.-Ing. Dickert)

Latarius, André
Hybride Heizsysteme im regionalen virtuellen Kraftwerk
19/2015 (Betreuer: Dipl.-Ing. Ma)

Schuster, Daniel
Bestimmung der optimalen Anzahl von Messpunkten zur Erfassung der Spannungsqualität auf Basis einer statistischen Analyse vorhandener Netzmessungen
18/2015 (Betreuer: Dr.-Ing. Jan Meyer)

Neils, Nico
Entwicklung von Schutzkonzepten für elektrische Inselnetze mit dezentraler Energieerzeugung
20/2015 (Betreuer: Dipl.-Ing. Palm)

Wever, Caroline
Entwicklung von Verfahren zur automatisierten Identifikation von Modellparametern einer Kraft-Wärme-Kopplungsanlage
22/2015 (Betreuer: Dipl.-Ing. Werner)

Rademacher, Stephan
Analyse und Modellierung des Verhaltens von Haushaltsgeräten gegenüber höherfrequenter Emission
23/2015 (Betreuer: Dipl.-Ing. Ungethüm)

Karakoyun, Ramazan
Messung und Modellverifikation der supraharmonischen Emission von Photovoltaik-Wechselrichtern
24/2015 (Betreuer: Dipl.-Ing. Klatt)

Armbruster, Markus
Untersuchungen zum Einfluss der Verteilung der Kontaktkraft und des Kontaktwiderstands auf das elektrische Kontaktverhalten von Pressverbindungen
25/2015 (Betreuer: Dipl.-Ing. Hildmann)

Groß, Silvio
Analyse und Modellierung der Ausbreitung von Supraharmonischen in Niederspannungsnetzen mit Wohnbebauung
01/2016 (Betreuer: Dipl.-Ing. Ungethüm)

Däberitz, Felix
Implementierung und Bewertung von Methoden der Quasi-Dynamischen-Zustandsschätzung im Verteilnetz
02/2016 (Betreuer: Dipl.-Ing. Schmidt)

Buhr, Jonas
Methoden zur effizienten Engpassanalyse von Verteilnetzen unter Berücksichtigung von steuerbaren Verbrauchs- und Erzeugungsanlagen
03/2016 (Betreuer: Dipl.-Ing. Heß)

Oberst, Marcella
Auswirkung von Diffusionsprozessen in stromtragenden Verbindungen der Materialpaarungen Ag-Sn, Ni-Sn und Ag-O
05/2016 (Betreuer: Dr.-Ing. Pfeifer)

Gaunitz, Stephan
Aufbau und Verifikation eines Versuchsstandes für AC-Kurzschlussversuche an Kontaktelementen
06/2016 (Betreuer: Dipl.-Ing. Israel)

Zhang, Chaoyi
Modellierung und Simulation von Niederspannungsstörlichtbögen
07/2016 (Betreuer: M.Sc. Wenzlaff)

Lu, Yuhao
Aufbau eines thermischen Modells für einen explosionsgeschützten Niederspannungs-Lastschalter mit FEM
08/2016 (Betreuer: Dipl.-Ing. Heger)

Han, Wei
Analyse der Oberschwingungsemission von Photovoltaik-Wechselrichtern kleiner Leistung im Frequenzbereich bis 2 kHz
09/2016 (Betreuer: Dipl.-Ing. Müller)

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.

Energie- und Messwandler

- Analytische Berechnungs- und messtechnische Bewertungsverfahren von Generatorstromwandlern mit erweitertem Frequenzmessbereich
- Modellierung und Optimierung des Frequenzübertragungsverhaltens von Mittelspannungs-Spezialtransformatoren
- Entwicklung einer Magnetfelderzeugungseinheit für eine magnetokalorische Klimaanlage

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
- Sternpunktbehandlung in Verteilnetzen

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 DAtabase)
- Identifikation und Qualifizierung korrelativer Zusammenhänge zwischen elektrischer bzw. klimatischer Umgebung und ausgewählten Elektroenergiequalitätskenngrößen
- Einfluss von Elektrofahrzeugen und Photovoltaik-Wechselrichtern auf die Strom- und Spannungsqualität im Niederspannungsnetz (ElmoNetQ)
- Entstehung und Ausbreitung 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

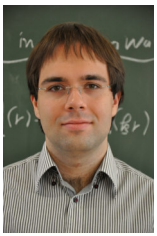
Schutz- und Leittechnik

- 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)
- Auswertung von Störfallaufzeichnungen
- Algorithmenentwurf zur schnelle Detektion von Störlichtbögen
- Inselnetzerkennung
- Entwurf digitaler Schutzalgorithmen
- Modellierung von Strom- und Spannungswandler zur Beurteilung der Tauglichkeit im Schutzsystem
- Entwurf von Schutzkonzepten spezieller Betriebsmittel
- Grundlagenuntersuchung zum Schutz bei Zwischensystemberührungen

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 „Energie- und Messwandler“



Christian Jäschke, M.Sc.

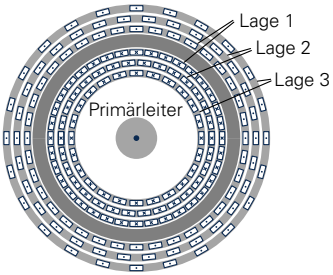
Berechnung der frequenzabhängigen Kopplungsresistanzen in der Wicklung von Hochstromwandlern

Projekt gefördert durch:
DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft

Durch den zunehmenden Einsatz leistungselektronischer Lasten und Betriebsmittel in Energieversorgungsnetzen steigen die Pegel höherfrequenter Stromkomponenten. Des Weiteren bewirken Schalthandlungen, Fehler und andere Ereignisse transiente Stromanteile mit großen Bandbreite. Die können aufgrund parasitärer Kopplungen innerhalb von Hochstromwandlern Resonanzen anregen.

Um solche Effekte schon während des Designs von Hochstromwandlern berücksichtigen zu können, wurde ein Berechnungsmodell zur Bestimmung des Frequenzgangs von Hochstromwandlern entwickelt. Um die Ausprägung der Resonanzeffekte korrekt abbilden zu können ist es notwendig auch die frequenzabhängigen Kopplungsresistanzen innerhalb des Hochstromwandlern zu berechnen. Diese bilden die ohmschen Verluste die durch Stromverdrängungseffekte (Skin- und Proximityeffekt) innerhalb der Wicklungslagen entstehen ab. Die Größe der resistiven Kopplungen ist dabei stark vom geometrischen Aufbau des Wandlers abhängig.

Um die großen Windungszahlen fertigungstechnisch zu realisieren, ist die Sekundärwicklung von Hochstromwandlern auf mehrere übereinanderliegende Lagen verteilt (Bild Ia und Ib).



(a) Schnitt senkrecht zur Rotationsachse

(b) Darstellung in Rotationsachse

(c) Stromdichte und magn. Feldstärke

Bild I: Aufbau und elektromagnetische Feldgrößen in einem Hochstromwandler

Durch Anwendung des Durchflutungsgesetzes und Ausnutzen von Symmetrien lässt sich das magnetische Feld innerhalb der Isolierung der Sekundärwicklung vereinfacht mit Hilfe analytischer Gleichungen beschreiben. Die magneti-

sche Feldverteilung innerhalb einer Wicklungslage (Bild Ic) lässt sich durch eine eindimensionale Helmholtzgleichung beschreiben (Gleichung (1) links). Dabei werden die Randwertbedingungen zur Lösung dieser Gleichung aus den magnetischen Feldstärken innerhalb der benachbarten Lagenisolierungen gewonnen. Aus der magnetischen Feldverteilung $\underline{H}_{\mathrm{L}\nu}(x)$ innerhalb der Wicklung lässt sich dann die Stromdichteverteilung $\underline{J}_{\mathrm{L}\nu}(x)$ innerhalb der Leiter bestimmen (Gleichung (1) rechts). Dabei wird auch die Stromverdrängung aufgrund des Skin- und Proximity-Effektes innerhalb der Lage abgebildet.

$$\left(\frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}x^2} + \underline{k}^2\right) \underline{H}_{\mathrm{L}\nu} = 0 \qquad \underline{k} = \sqrt{-\mathrm{j}\,\omega\,\mu_0\,\kappa} \qquad \underline{J}_{\mathrm{L}\nu} = \frac{\mathrm{d}\underline{H}_{\mathrm{L}\nu}}{\mathrm{d}x} \tag{1}$$

Die Kopplungsresistanzen innerhalb des Hochstromwandlers werden mit Hilfe eines Leistungsansatzes berechnet. Dabei wird zunächst die gesamte Verlustleistung innerhalb des Hochstromwandlers als Funktion aller Lagenströme $\underline{I}_{\mathrm{L}\nu}$ bestimmt. Diese beinhaltet dabei sowohl die Verluste innerhalb des magnetischen Kerns ($P_{\mathrm{V\,K}}$) als auch die Verluste aller Wicklungslagen ($P_{\mathrm{V\,L}\nu}$).

$$P_{\mathrm{V}} = P_{\mathrm{V\,K}} + \sum_{\nu=1}^{n} P_{\mathrm{V\,L}\nu} = f\left(\underline{I}_{\mathrm{p}}, \underline{I}_{\mathrm{L}1}, \ldots, \underline{I}_{\mathrm{L}n}\right) \quad \text{mit} \quad P_{\mathrm{V\,L}\nu} = \frac{1}{\kappa} \iiint\limits_{(V_{\mathrm{L}\nu})} \underline{J}_{\mathrm{L}\nu}\, \underline{J}^{*}_{\mathrm{L}\nu} \mathrm{d}V \tag{2}$$

Mit Hilfe eines Stromwandler-Kernmodells [1] lassen sich die frequenzabhängigen Kernverluste aufgrund von Wirbelströmen innerhalb der Kernbleche beschreiben. Die Wicklungsverluste innerhalb einer Lage ν lassen sich aus der Stromdichteverteilung innerhalb der Wicklungen (Gleichung (2) rechts) bestimmen.
Aus dem funktionalen Ausdruck der Verlustleistung innerhalb des gesamten Wandlers lassen sich nun durch Differentiation (Gleichungen (3)) die *Gegenresistanz* $R_{\mathrm{p\,L}\xi}$ zwischen dem Primärleiter und der ξ-ten Sekundärlage, die *Gegenresistanz* $R_{\mathrm{L}\xi\,\mathrm{L}\zeta}$ zwischen der ξ-ten und der ζ-ten Sekundärlage, sowie die *Selbstresistanz* $R_{\mathrm{L}\xi}$ der ξ-ten Sekundärlage bestimmen.

$$R_{\mathrm{p\,L}\xi} = \frac{1}{2}\frac{\partial^2 P_{\mathrm{V}}}{\partial I_{\mathrm{p}}\,\partial I_{\mathrm{L}\xi}} \qquad R_{\mathrm{L}\xi\,\mathrm{L}\zeta} = \frac{1}{2}\frac{\partial^2 P_{\mathrm{V}}}{\partial I_{\mathrm{L}\xi}\,\partial I_{\mathrm{L}\zeta}} \frac{1}{\cos\left(\varphi_{I\mathrm{L}\xi} - \varphi_{I\mathrm{L}\zeta}\right)}\bigg|_{\xi\neq\zeta} \qquad R_{\mathrm{L}\xi} = \frac{1}{2}\frac{\partial^2 P_{\mathrm{V}}}{\partial^2 I_{\mathrm{L}\xi}} \tag{3}$$

Die Kopplungsresistanzen zwischen den Lagen resultieren dabei ausschließlich aus Stromverdrängungseffekten die durch Stromflüsse in der jeweils anderen Lage hervorgerufen wird (Proximity-Effekt). Da dieser Effekt nur bei Wechselströmen auftritt und sich mit steigender Frequenz verstärkt, werden $R_{\mathrm{p\,L}\xi}$ und $R_{\mathrm{L}\xi\,\mathrm{L}\zeta}$ für $\omega \to 0$ zu null. Die Frequenzabhängigkeit der Selbstresistanzen $R_{\mathrm{L}\xi}$ entsteht durch die Stromverdrängung aufgrund des in der jeweiligen Lage fließenden Stromes (Skineffekt). Für $\omega \to 0$ verschwindet dieser Effekt und die Resistanz der Lagen reduziert sich auf dessen Gleichstromwert.

[1] 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.



Matthias Nilges, M.Sc.

Frequenzabhängiges Übertragungsverhalten einer Luftspule

Transformatoren werden aufgrund von Schalthandlungen, oder auch durch den Einsatz an Frequenzumrichtern, höherfrequenten Spannungen ausgesetzt. Vor allem beim direkten Einsatz an einem Umrichter kann die kontinuierliche Aussendung höherfrequenter Spannungen zu einer kritischen Anregung von Resonanzen innerhalb des Transformators führen. Um in den Entwurf kostenintensiver Filteranlagen die elektrischen Eigenschaften eines Transformators einfließen zu lassen, ist bereits während der Designphase eine möglichst exakte Berechnung der Resonanzen eines Transformators erforderlich.

Im ersten Arbeitsschritt hin zu einem frequenzabhängigen Transformatormodell ist es zunächst zweckmäßig, die Nichtlinearität des Eisenkerns und die Verkettung zwischen mehreren Phasen außen vor zu lassen. Es ergibt sich somit die vergleichsweise einfache Luftspulenanordnung aus Bild I. Für diese wird zunächst ein schaltungstechnisches Ersatzschaltbild erstellt (Bild II). In Abhängigkeit des betrachteten Frequenzbereichs ist es häufig zulässig, einige Elemente zu vernachlässigen, da deren Einfluss erst bei weitaus höheren Frequenzen relevant ist. Anhand von Messungen und FEM-Simulationen hat sich hierbei herausgestellt, dass nur die Kapazitäten innerhalb der Wicklungen relevant sind. Der Einfluss der übrigen Kapazitäten (in Bild II grau dargestellt) ist vernachlässigbar, so dass sich das System deutlich vereinfacht.

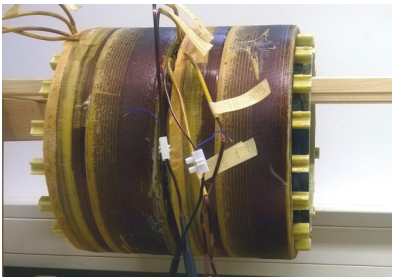


Bild I: Luftspule

Anschließend werden die relevanten Kapazitäten, Induktivitäten und Leitungswiderstände einerseits analytisch, andererseits mithilfe einer FEM-Simulation ermittelt und das Gleichungssystem aufgestellt. Der in III dargestellte Vergleich des resultierenden frequenzabhängigen Übertragungsverhaltens des Ersatzschaltbil-

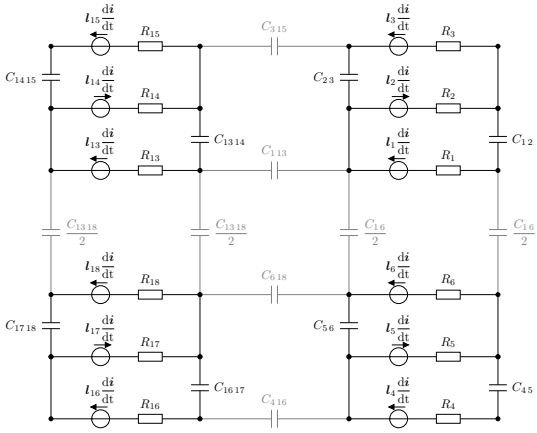


Bild II: Schaltungstechnisches Ersatzschaltbild

des mit Messungen der Anordnung zeigt grundsätzlich eine sehr gute Übereinstimmung. Aber auch eine starke Abhängigkeit von den verwendeten Geometrie- und Materialparametern ist ersichtlich. Hier wurde als Beispiel die Permittivität der harzimprägnierten Glasfaserisolation variiert, die eine Temperaturabhängigkeit besitzt. Bspw. verändert sich die Permittivität bestimmter Kabelharze im Bereich von 3,0 bis 5,5 für Temperaturen zwischen 23 °C und 80 °C [1]. Für ein exaktes Modell sind entsprechend genauere Material- und Geometriedaten notwendig. In den nächsten Schritten ist daher einer Bestimmung der Materialeigenschaften erforderlich, so dass im Anschluss der Übergang zum Einphasentrafo (Berücksichtigung des Kerns) als Grundlage für dreiphasige Transformatoren erfolgen kann.

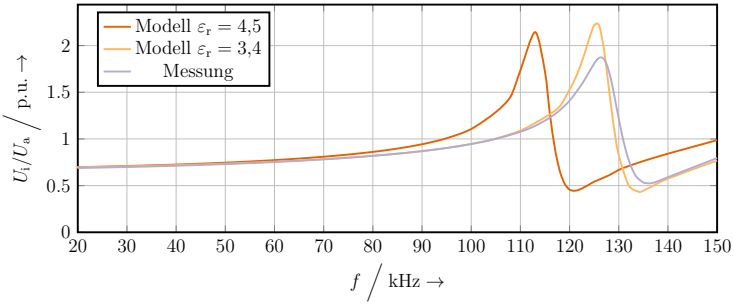


Bild III: Frequenzabhängiges Übertragungsverhalten der Luftspule

[1] 3M Deutschland GmbH, *3M Elektro-Produkte Gesamtkatalog*. 1. Auflage. 3M Deutschland GmbH, Neuss 2008.

Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Planung und Betrieb von Netzen“



Rengin Idil Cabadag, M.Sc.

Providing Reactive Power Requirements of Sub-Transmission Grids by Decentralized Wind Farms

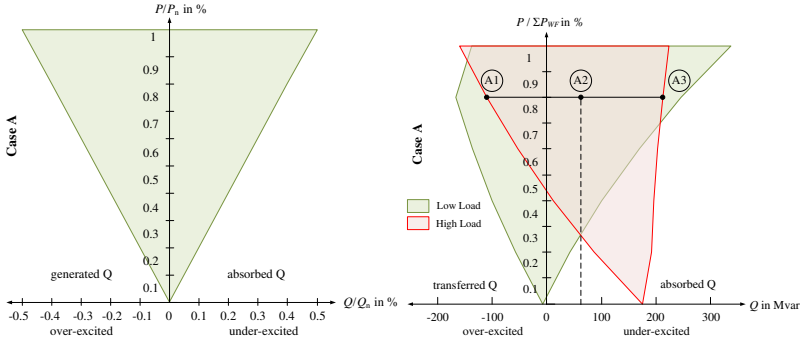
There has been remarkable increase in the amount of decentralized wind farms (WFs) in 110 kV sub-transmission grids. The high penetration of WFs causes complicated impacts on power flows and voltages. Therefore, WFs have operate bus voltages of the sub-transmission grid continuously within a permissible range. Furthermore, WFs to should transfer required amount of reactive power into transmission grid and/or absorb the necessary amount of reactive power in the sub-transmission considering the demand of transmission system operators (TSOs). In other words, reactive power requirements at connection points (CPs) where sub-transmission grids are connected to the transmission grids should be satisfied. The reactive power management is realized using both a novel linear programming (LP) approach based on voltage sensitivity and particle swarm optimization (PSO). The objective of reactive power management is firstly to keep bus voltages within a specific range and secondly to acquire desired reactive power at connection points (CPs). In this frame, a novel reactive power control strategy is introduced based on the related part of voltage sensitivity matrix and it is implemented to a 110 kV realistic sub-transmission test grid.

Table I: Comparison of the Simulation Results of PSO and LP

Scenario	Point	Q_{CP} in Mvar		P_{loss} in MW		Time in s	
		PSO	LP	PSO	LP	PSO	LP
High-Load (Case A)	A1	-107.97	-107.89	0.824	0.817	4.192	0.494
	A2	64.82	64.83	0.525	0.490	4.535	0.309
	A3	210.43	210.35	2.091	1.709	1.641	0.326
Low-Load (Case B)	B1	-146.39	-146.50	3.180	2.663	3.942	0.927
	B2	-0.03	-0.03	2.469	2.454	4.694	0.438
	B3	282.02	282.03	5.579	5.536	4.559	0.336

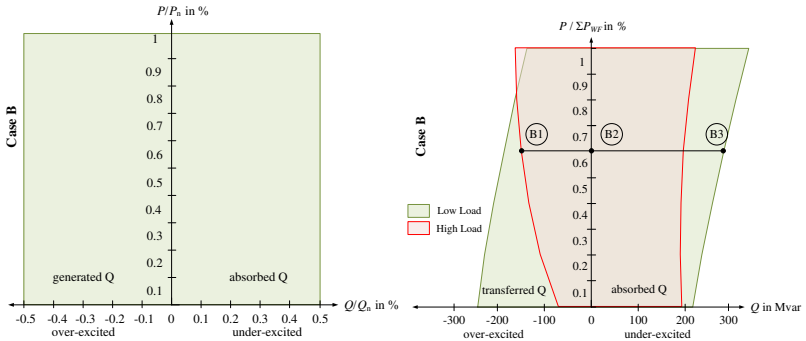
The different load scenarios including high- and low- load scenarios are realized to display the reactive power capability of the sub-transmission grid. While the high-load scenario is chosen as Case A, the low-load scenario is chosen as Case B. In order to define reactive power capability curve of the sub-transmission grid as in Fig. Ib and IIb, two different WF capability curves as in Fig. Ia for Case A

and Fig. IIa for Case B are used. While the points of A1, A2 and A3 in the first capability curves are selected in high-load scenario, the points of B1, B2 and B3 are selected in the second capability curve in low-load scenario. The desired reactive power values at CPs for both scenarios are achieved by both PSO and LP as in Table I. However, LP showed a faster convergence characteristic than PSO. Additionally, the reactive power requirements are achieved with less line losses with LP than PSO.



(a) wind farm (b) 110 kV sub-transmission grid

Figure I: Reactive power capability for Case A



(a) wind farm (b) 110 kV sub-transmission grid

Figure II: Reactive power capability for Case B

[1] Cabadag R., Schmidt U., Tiebel R. and Schegner P., *Computer Based Analysis of Distributed Wind Farms for Reactive Power Management in Sub-Transmission Grids*, NEIS 2016, Hamburg, September 2016.

[2] Cabadag R., Dickert J., Schmidt U. and Schegner P., *Providing Reactive Power Requirements of Sub-Transmission Grids by Decentralized Wind Farms*, RTUCON 2016, Riga, October 2016.



Niels Erdmann, Dipl.-Ing.

Die Auswirkungen der 10H-Regelung in Bayern

Seit November 2014 fordert die Bayerische Bauordnung [1] für Windenergieanlagen (WEA) einen Mindestabstand vom 10-fachen ihrer Höhe zu Wohngebäuden - die sog. *10H-Regelung*. Gegen diese Gesetzesänderung wurden mehrere Klagen eingereicht und all diese im Mai 2016 vom Bayerischen Verfassungsgerichtshof [2] abgelehnt. Die Auswirkungen der bestätigten 10H-Regelung auf den möglichen Zubau von WEA in Bayern wurde daraufhin mit der folgenden Berechnung untersucht:

Moderne Onshore-WEA erreichen regelmäßig eine Nabenhöhe von 130 m und einene Rotorblattlänge von 70 m. Solch eine Anlage mit 200 m Höhe muss folglich einen Mindestabstand von 2000 m zu Wohngebäuden einhalten. Zur Berechnung und Visualisierung wird das Geoinformationssystem (GIS) QGIS eingesetzt und die Daten der Siedlungsflächen in Bayern werden aus OpenStreetMap (OSM) importiert. Die graue Fläche in Bild I entspricht den um den Mindestabstand von 2000 m erweiterten Siedlungsflächen. Bayern hat in der verwendeten Darstellung ein Gesamtfläche von 70 415 km^2. Nach Abzug der 10H-Flächen bleiben theoretisch noch 3260 km^2 für den Zubau WEA.

Neben der 10H-Regelung müssen weitere Einschränkungen berücksichtigt werden. Für den Bau von WEA sind Nationalparks, Naturschutzgebiete, Kernzonen von Biosphärenreservaten und die Zone C des sogenannten Alpenplans *generell* ausgenommen. Im *Regelfall* sind auch Vogelschutzgebiete auszuschließen, da deren Erhaltungsziele durch WEA erheblich beeinträchtigt werden. Auch Militärgebiete und Gewässer können nicht bebaut werden und zusätzlich sind Sicherheitsabstände bei Bundesautobahnen (100 m), Radaranlagen (5000 m) und bestehenden WEA (300 m) einzuhalten. Diese generellen und regelmäßigen Ausschlussflächen sind in Bild I in rot dargestellt und bilden eine Gesamtfläche von 7821 km^2.

Neben den genannten Bereichen müssen zusätzlich eine Vielzahl von Gebieten *sensibel* behandelt werden. Dazu gehören Flora-Fauna-Habitate nach der Natura 2000-Richtlinie, das komplette Gebiet der Biosphärenreservate und Landschaftsschutzgebiete. D. h. ein Bau von Windkraftanlagen ist dort nicht grundsätzlich ausgeschlossen. Von den in OSM verzeichneten 851 WEA in Bayern (Stand: Mai 2016), befinden sich lediglich 7 % in sensiblen Gebieten. Bild I zeigt diese Fläche von 27 021 km^2 in orange.

Nach Ausschluss all dieser Gebiete bleibt eine nutzbare Fläche für den Neubau von WEA von 220 km^2. Dies entspricht 0,3 % Bayerns, verteilt sich auf 241 Einzel-

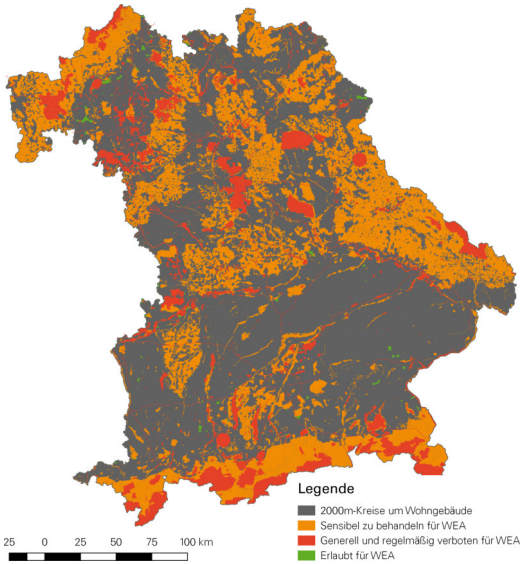


Bild I: Mögliche Potenzialfächen für den Zubau von Windenergieanlagen

flächen und ist in Bild I grün dargestellt. Etwa 50 % dieser Einzelflächen sind so klein, dass nur eine WEA errichtet werden könnte. Unter Beachtung der Abstände zwischen den WEA könnten in Bayern insgesamt noch 850 WEA installiert werden. Dies entspricht bei 3 MW pro WEA einer Gesamtleistung von 2,55 GW.

Die Fläche von 220 km^2 ist jedoch sehr optimistisch gerechnet. Viele Gebiete können nicht verallgemeinernd betrachtet werden und wurden daher bei Ausschluss vernachlässigt: Waldflächen, Flughäfen, Flugplätze, Richtfunkverbindungen, Schienenverkehr und Vogelzuggebiete. Auch die Beschaffenheit des Untergrunds und die örtliche Windprognose haben keinen Eingang gefunden! Die Zahl der tatsächlich realisierbaren WEA wird sich folglich weit unter diesen 850 einpegeln. Selbst, wenn man noch 7 % (60 WEA) in den sensiblen Gebieten zulassen würde.

Bei einer Reduzierung der 10H- auf eine 5H-Regelung steigt die verfügbare Fläche von 0,3 % auf 6 % Bayerns und die Zahl der theoretisch möglichen WEA erhöht von 850 auf fast 16 000 !

[1] Bayerischer Landtag, *Bayerische Bauordnung (BayBO)*, mit der letzten Änderung vom 09.05.2016, BayRS 2132-1-I.
[2] Bayerischer Verfassungsgerichtshof, *Entscheidung vom 09.05.2016*, Az. I. Vf. 14-VII-14, Vf. 3-VIII-15, Vf. 4-VIII-15, (GVBl. S. 89).



Sebastian Krahmer, Dipl.-Ing.

Analyse des Stabilitätsverhaltens von Windenergieanlagen mit *Q(U)*-Kennlinie

Die Bedeutung der Windenergie als Energieträger der öffentlichen Stromversorgung nimmt weiterhin zu. War es jedoch bis zum Inkrafttreten der SDLWindV 2011 [1] in Deutschland noch üblich die an das Elektroenergieversorgungsnetz angeschlossenen Windenergieanlagen (WEA) mit einem $\cos\varphi = 1$ zu betreiben, müssen seither Neuanlagen konkrete Anforderungen hinsichtlich des Beitrags zu den Systemdienstleistungen erfüllen. Vorgaben zu Frequenzhaltung, Spannungshaltung, Verhalten bei Störungen und Netzwiederaufbau sind beispielsweise in der TAB Hochspannung [2] definiert.

Die *Q*(*U*)-Regelung ist in diesem Kontext ein leistungsstarkes Konzept zur Gewährleistung der Spannungshaltung. Sie bietet gegenüber der $\cos\varphi(P)$-Regelung den Vorteil, dass die Blindleistungsbereitstellung direkt an die tatsächliche Spannung am Netzanschlusspunkt (NAP) gekoppelt werden kann. Gleichzeitig resultiert aus der Spannung als gemeinsame Regelgröße eine gegenseitige Beeinflussung von (auch räumlich verteilten) Windparks. Es ergibt sich die Notwendigkeit, den Einfluss des Regelverfahrens auf die Spannungsstabilität analytisch zu untersuchen und Anwendungsregeln abzuleiten.

Bild I zeigt den Regelkreis eines Windparks (WP) mit *Q*(*U*)-Kennlinie. Dieser kann für die gleichzeitige Betrachtung mehrerer WPs unter Berücksichtigung der Knotensensitivitätsmatrizen $\boldsymbol{K}_{\mathrm{Q}}$ und $\boldsymbol{K}_{\mathrm{P}}$ zu einem Multiple-Input-Multiple-Output-System (MIMO) erweitert werden.

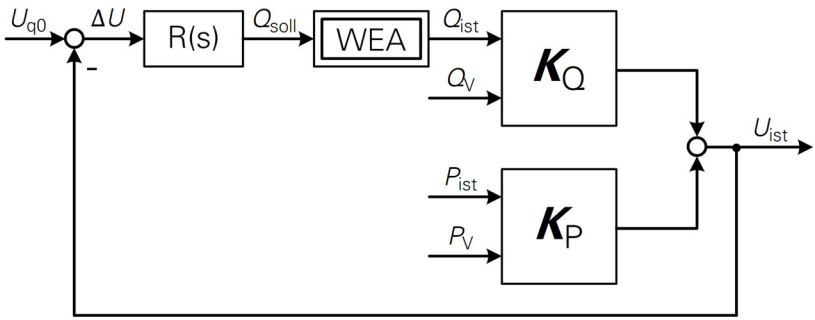


Bild I: Regelkreis eines Windparks

Dabei repräsentiert der R(*s*)-Block die Regeleinheit des WP eingeschlossen *Q*(*U*)-Kennlinie sowie Mittelung und Aufteilung von Q_{soll} auf die einzelnen Anlagen. Die Regelstrecke WEA bildet den Anlagenregler unter Berücksichtigung des Inverterverhaltens und der Systemtotzeit nach. In einer ersten Untersuchung wurde ein linearer Regler ohne Totband und Begrenzung angenommen, die Bewertung erfolgte anhand des Nyquist-Kriteriums. Die Parameter Kommunikationstotzeit, Kennliniensteigung sowie interne Mittelung wurden variiert und deren Einfluss auf die Spannungsstabilität untersucht. Bild I zeigt das instabile Einschwingverhalten infolge zu hoher Kennlinienverstärkung und Totzeit sowie den stabilisierenden Einfluss einer geeigneten Mittelung.

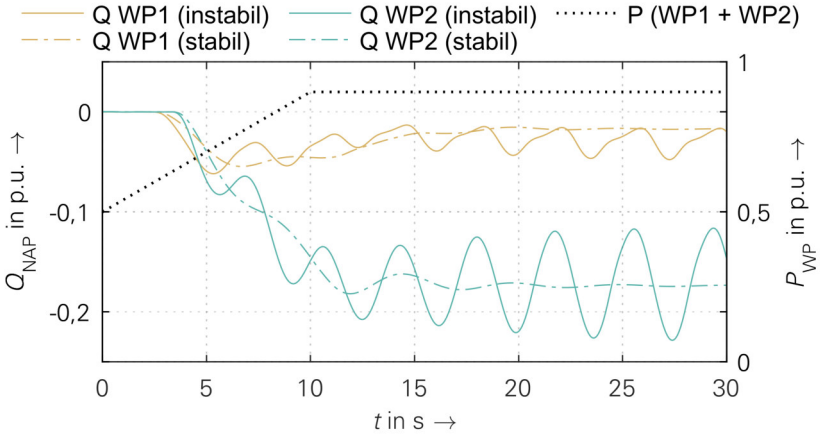


Bild II: Blindleistungsbereitstellung zweier Windparks (mit Totzeit) bei einer rampenförmigen Erhöhung der Wirkleistungseinspeisung

Insbesondere in Netzgruppen mit einer Vielzahl an WPs und hohem Kabelanteil ist die Spannungssensitivität hinsichtlich der Blindleistung zu beachten. In Kombination mit ungünstig gewählten *Q*(*U*)-Kennlinienanstiegen kann eine kritische Gesamtverstärkung überschritten werden. Jedoch kann durch für jeden WP spezifisch ermittelte Grenzen für Anstiege und zulässige Totzeiten die Spannungsstabilität innerhalb einer Netzgruppe sichergestellt werden. Parameterstudien mit Fokus auf die Dynamik der Regelung, unter Einbeziehung von Netzstrukturen, bilden die Basis für die Ausgestaltung von Anwendungsregeln. Weiterhin ist der Einfluss der Nichtlinearität der *Q*(*U*)-Kennlinie wie das Spannungstotband und die *Q*-Begrenzung zu untersuchen.

[1] Bundesregierung Deutschland, *Verordnung zu Systemdienstleistung durch Windenergieanlagen (SDLWindV)*. juris, Berlin 2011.

[2] Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e .V., *Technische Bedingungen für den Anschluss und Betrieb von Kundenanlagen an das Hochspannungsnetz (TAB Hochspannung)*. VDE-Verlag, Berlin 2015.



Marcus Kreutziger, Dipl.-Ing.

Anwendungsfall - optimierte Bereitstellung von Blindleistung aus dezentralen Erzeugungsanlagen im 110-kV-Verteilnetz

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Beiträge zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen (SDL) müssen zukünftig immer mehr von dezentralen Erzeugungsanlagen (DEA) erfolgen. Um Beiträge für ausgewählte SDL koordiniert bereitstellen zu können, sollen Konzepte entwickelt und deren Funktionstüchtigkeit durch Feldtests nachgewiesen werden [1].

Es gilt zunächst zu beschreiben, welche Anlagen für unterschiedliche Anwendungsfälle zu bevorzugen sind, um sowohl zu möglichst vielen Zeitpunkten eine bedarfsgerechte Blindleistungssteuerung zu gewährleisten, aber auch große Wirkung auf die anwendungsfallspezifische Zielgröße zu erzielen.

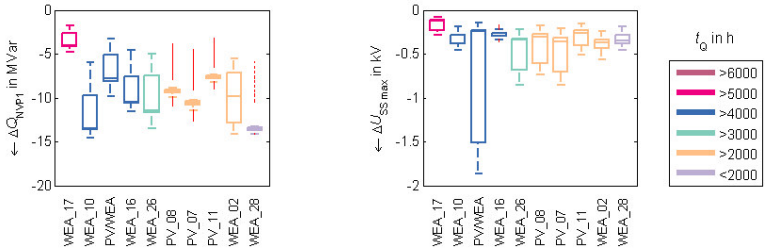
Ergebnis der Untersuchung ist, dass DEAs erhebliche Potenziale für die Bereitstellung von SDL haben [2]. Es konnte gezeigt werden, dass über ein Jahr deutlich mehr Stunden Blindleistung bereitgestellt bzw. bezogen werden kann, als der Wert der Volllaststunden (< 1700 h) vermuten lässt. Insgesamt ist festzuhalten, dass von 47 untersuchten Anlagen in zwei 110-kV-Verteilnetzgruppen sich 18 Anlagen mehr als 4.000 Stunden im Jahr am Blindleistungsmanagement beteiligen können und daher für einen Feldtest zu bevorzugen sind.

Die zwei wichtigsten Anwendungsfälle für den Verteilnetzbetreiber (VNB) sind die Bereitstellung einer Blindleistung am Netzverknüpfungspunkt (NVP) und die Spannungshaltung innerhalb des eigenen Netzes. Aus diesem Grund wurde untersucht, welche Wirkung DEAs auf die Blindleistungsbilanz ΔQ_{NVP} an einem NVP und die Absenkung der höchsten Spannung im Netz $\Delta U_{\mathrm{SS\,max}}$ für das Jahr 2014 gehabt hätten. Die Untersuchungen erfolgten an ländlich geprägten 110-kV-Verteilnetzgruppen mit zwei bzw. drei NVPs.

Bild I zeigt die Auswertung der Anlagenpotenziale einer Auswahl von DEAs für die genannten Anwendungsfälle. Von 47 untersuchten DEAs haben können 28 Anlagen die NVP-scharfe Blindleistung signifikant beeinflussen. Dem gegenüber stehen nur 8 Anlagen, die einen hohen Einfluss auf die höchste Spannung haben.

Wird die Schnittmenge zwischen Blindleistungsverfügbarkeit und Anwendungsfall gebildet, ist zu erkennen, dass DEAs mit hoher Blindleistungsverfügbarkeit nicht zwingend einen signifikanten Einfluss auf die anwendungsfallspezifische Zielgröße haben. Die Anzahl der insgesamt geeigneten Anlagen reduziert sich auf lediglich 12 DEAs.

In einer umfassenden Netzoptimierung unter Einbeziehung aller im Netz befindlichen DEAs und der Kombination verschiedener Anwendungsfälle können auch Anlagen mit geringem Einfluss auf die anwendungsfall-spezifischen Zielgrößen Beiträge leisten. Dies ermöglicht die Ermittlung des bestmöglichen Netz-



(a) Spannungsregelpotenzial der höchsten Spannung

(b) Berechnung des SDL-Potenzials für DEAs in ausgewählten Verteilnetzgruppen im Jahr 2014

Bild I: Blindleistungsregelpotenzial am NVP

zustandes unter Einhaltung aller Randbedingungen. Die Beschreibung der Optimierungsumgebung erfolgt in einem Konferenzbeitrag durch das Fraunhofer IWES [3].

Es wurde ein Optimierungsalgorithmus entwickelt, welcher die gezielte Bereitstellung von Blindleistung je nach Anwendungsfall unter Berücksichtigung aller netztechnischen Randbedingungen ermöglicht. Die Vorgabe war dabei eine möglichst geringe Rechenzeit je optimiertem Netzzustand zu erreichen.

Das entwickelte Optimierungsverfahren minimiert dabei die Spannungsdifferenzen innerhalb einer Verteilnetzgruppe bezüglich einer Referenzspannung. Die Art und Weise der Anlagenoptimierung wird durch eine Sensitivitätsanalyse bestimmt. Die interne Iterationsschrittweite wird dynamisch berechnet. Sie ist abhängig vom noch vorhandenen Blindleistungspotenzial der DEAs im aktuellen und nächsten Iterationsschritt, der Abweichung zur Zielgröße und den begrenzenden Randbedingungen wie Spannungsgrenzen oder auch der $(n-1)$-Sicherheitsprüfung vor jedem Iterationsschritt.

Dieses Optimierungsverfahren ermöglicht die Prüfung der $(n-1)$-Sicherheit vor jedem Iterationsschritt und somit die Anpassung der Anlagengrenzwerte innerhalb der Optimierung. Die bisher bekannten Optimierungsverfahren konnten die Berechnung entweder mit hoher Genauigkeit und hohem zeitlichem Rechenaufwand oder schnell dann jedoch nur mit starken Vereinfachungen hinsichtlich gegebener Randbedingungen und Netzsicherheit durchführen.

[1] Technische Anwendungsszenarien, [online] http://www.sysdl20.de/ergebnisse/, Abruf: 15.09.2016

[2] M. Kreutziger, W. Becker et al., *Anwendungsfall-optimierte Bereitstellung von Blindleistung aus dezentralen Erzeugungsanlagen im 110-kV-Verteilnetz*,EnInnov 2016, Graz, Österreich, 2016 [3] S. Wende-von-Berg et al, SysDL 2.0–Methoden und Anwendungen, EnInnov 2016, Graz, Österreich, 2016

[3] S. Wende-von-Berg et al, SysDL 2.0–Methoden und Anwendungen, EnInnov 2016, Graz, Österreich, 2016



Tobias Schnelle, Dipl.-Ing.

Erweiterung der Regelung einer leistungselektronischen Netzkupplung zur Kompensation von Unsymmetrien

Der stetige Zubau dezentraler Erzeugungsanlagen in Deutschland führte in den vergangenen Jahren zu einer zunehmenden Dezentralisierung der Erzeugungsleistung. Mit dem flächendeckenden Rollout intelligenter Messsysteme und dem erwarteten steigenden Anteil von Elektrofahrzeugen wird zukünftig auch eine Dezentralisierung steuerbarer Lasten erwartet. Ergänzt wird diese Entwicklung durch den steigenden Zubau an PV-Speichersystemen. Die gleichzeitige Steuerung mehrerer dezentraler Akteure durch Vermarkter kann dabei zu negativen Einflüssen auf die Spannungsqualität führen.

Das in [1] vorstellte Konzept der modularen Netze (MN) bietet hier eine geeignete Möglichkeit, die geforderte Spannungsqualität unabhängig von der Qualität des vorgelagerten Netzes (VN) endkundennah bereitzustellen. Dabei wird durch eine leistungselektronische Netzkupplung eine dezentrale Netzführung unter Wirkleistungsbezug aus dem vorgelagerten Netz ermöglicht. Die in [1] durchgeführten Untersuchungen berücksichtigen nur eine symmetrischen Netzbelastung. Aufgrund einphasiger Verbraucher und Einspeiser können Mittel- und Niederspannungsnetze jedoch nicht als ideal symmetrisch angenommen werden. Bei der bisherigen Verwendung einer Mitsystemregelung (MSR) werden die nicht durch den Umrichter bereitgestellten Lastströme aus der Filterkapazität bezogen. Die dadurch unterschiedlich aufgeladenen Kapazitäten führen zur Spannungsunsymmetrie am Netzverknüpfungspunkt, die sich in einer Gegensystemkomponente des Raumzeigers widerspiegelt.

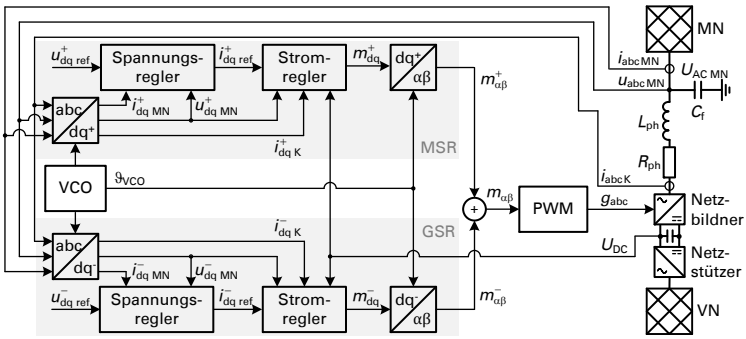


Bild I: Mit-(MSR)- und Gegensystemregelung (GSR) des Netzbildners

Um auch unter unsymmetrischer Netzbelastung eine symmetrische Netzspannung sicherzustellen, wird die Regelung des netzbildenden Konverters um eine Gegensystemregelung (GSR) erweitert, vgl. Bild I. MSR und GSR sind dabei strukturell gleich aufgebaut. Bei der GSR wird jedoch die Clarke-Park-Transformation mit negativem Rotationswinkel durchgeführt, um das Gegensystem der Spannung zu generieren. Aufgrund der unsymmetrischen Belastung ergeben sich die dq-Größen zu Gleichgrößen mit einem überlagerten, doppelt-netzfrequenten Anteil. Um dennoch PI-Regler verwenden zu können, wird nach der Transformation ein Bandsperrfilter angewendet (nicht in Bild I dargestellt). Nach Rücktransformation der Gleichgrößen in das statorfeste Koordinatensystem können die Modulationssignale beider Regelungen zusammengeführt werden.

Zur Untersuchung des Regelverhaltens wurden die Netzkupplung und das modulare Netz in DIgSILENT PowerFactory modelliert. Zu Beginn der Simulation ist nur die MSR aktiv. Zum Zeitpunkt $t = 100\,\mathrm{ms}$ wird eine Last einphasig getrennt, wodurch eine Stromunsymmetrie erzeugt wird. Die GSR wird zum Zeitpunkt $t = 200\,\mathrm{ms}$ aktiviert.

In Bild II ist zu erkennen, dass die unsymmetrische Strombelastung zu einer doppelt-netzfrequenten Oberschwingung des Spannungsraumzeigers an der Sammelschiene des modularen Netzes führt. Aufgrund der unsymmetrischen Auslastung des Netzbildners ergibt sich zudem eine doppelt-netzfrequenten Oberschwingung auf der Zwischenkreisspannung, siehe Bild III. Durch die Aktivierung der GSR wird die Spannungsunsymmetrie wesentlich reduziert. Auf die Zwischenkreisspannung hat die GSR keinen Einfluss. In weiterführenden Simulationen wird die Rückwirkung der oberschwingungsbelasteten Zwischenkreisspannung auf das vorgelagerte Netz untersucht.

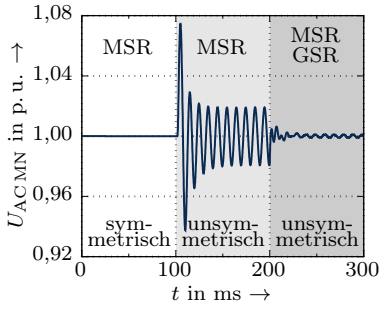


Bild II: Spannung im Modularen Netz

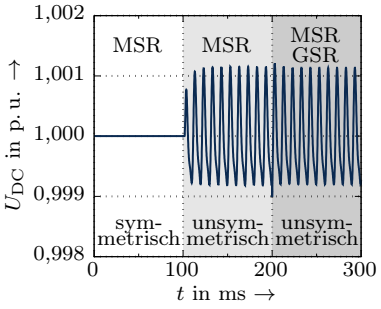
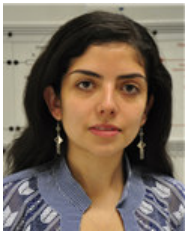


Bild III: Zwischenkreisspannung

[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 unbalance in public low voltage networks

The harmonic current unbalance in public low voltage networks has been analyzed based on measurements of 130 German grids, which includes sites with residential users, shopping centers and office buildings. New individual and aggregated harmonic unbalance indices were applied, which are based on the symmetrical components obtained through the Fortescue decomposition for each harmonic order. One of those indices is the *Aggregated harmonic unbalance index* (*AHU*):

$$AHU^{(h)} = \frac{\sqrt{\left(I_{u1}^{(h)}\right)^2 + \left(I_{u2}^{(h)}\right)^2}}{I_b^{(h)}} \qquad (1)$$

where $I_{u1}^{(h)}$ and $I_{u2}^{(h)}$ are the first and second unbalance components and $I_b^{(h)}$ is the balanced component of each harmonic current of order *h*. The balanced component satisfies the symmetry property in time domain and reflects the so called “characteristic” harmonic sequence (e.g. postive-sequence for the fundamental, zero-sequence for the third, negative-sequence for the fifth, positive-sequence for seventh and so on). If $AHU^{(h)}$ has a value higher than 100%, the harmonic current is dominated by unbalanced components.

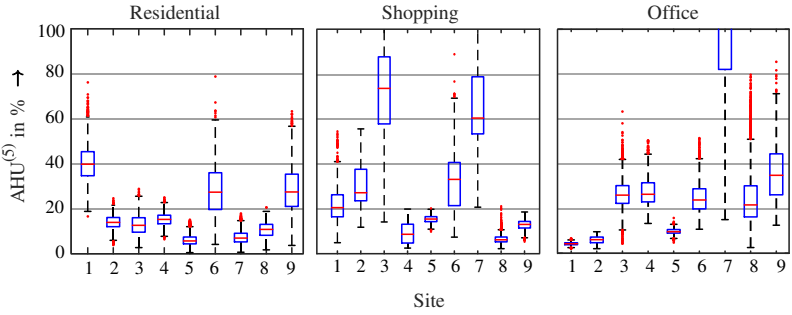


Figure I: AHU factors of some LV grids with residential users, shopping centers and office buildings.

High values of $AHU^{(h)}$ indices are not always a risk for the network. Especially if such high unbalances occur during times of low power consumption they correspond only to small absolute unbalance currents. Therefore, the analysis in this study is limited to specific time periods with higher power consumption. In order to simplify and automate the selection of the periods for analysis, the 75th percentile of $I_b^{(h)}$ is used as threshold. $AHU^{(h)}$ is only evaluated when the balanced current is above that limit.

Fig. I shows exemplary the boxplot of the $AHU^{(h)}$ indices obtained of some networks with different types of users for the fifth harmonic. The indices were calculated using the 1-minute-measurements of one week in winter.

Comparison of the indices obtained for all networks lead to the following conclusions:

- The index $AHU^{(h)}$ varies considerably between the sites. It is mostly below 60% but can reach values higher than 100%.
- Fundamental current has the lowest unbalance. Unbalance levels increase with the harmonic order.
- Harmonic current unbalance is usually not linked to fundamental current unbalance.
- In case of residential sites, harmonic unbalance is not related to the amount of connected users. However, only networks with more than 30 users were analyzed.
- The amount of installed generation does not show an identifiable impact on the unbalance indices at residential sites. However, as the amount of generated power during the measurement interval is not known, this conclusion should be more comprehensive verified by further measurements.
- Exceptional high current unbalance levels have been found in some networks with shopping centers and office buildings as unbalance issues have not been taken properly into account at the design stage.

The analysis suggests that harmonic studies in public LV networks have to take into account harmonic current unbalances in order to obtain realistic results. Finally, more research on the possible adverse effects of unbalanced harmonic voltages and currents on equipment seem needed.

[1] A.M. Blanco, J. Meyer, P. Schegner, R. Langelly, A. Testa. *Survey of Harmonic Current Unbalance in Public Low Voltage Networks.* International Conference on Harmonic and Quality of Power 2016. Belo Horizonte, Brazil.



Max Domagk, Dr.-Ing.

Indexbasierte Bewertung der Spannungsqualität in Verteilungsnetzen

Projekt gefördert durch:
DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft

Die Elektroenergiequalität gewinnt in den Verteilungsnetzen moderner Industriegesellschaften wie Deutschland zunehmend an Bedeutung. Eine angemessene Spannungsqualität ist eine der Grundvoraussetzungen, die einen störungsfreien Betrieb aller angeschlossenen Geräte und Anlagen ermöglichen. Entsprechend nehmen die Maßnahmen der Verteilungsnetzbetreiber zur Überwachung der Spannungsqualität und die daraus resultierende Menge an Messdaten stetig zu. Um die Auswertung und die Bewertung der Spannungsqualität insbesondere für große Datenmengen effizient zu gestalten, sind neue und automatisierbare Bewertungsverfahren notwendig.

Eine der wichtigsten Standards zur Bewertung der Spannungsqualität in Europa ist die EN50160. Die Bewertung der verschiedenen Qualitätsparameter (u. a. langsame Spannungsänderungen, Spannungsharmonische oder Spannungsunsymmetrie) erfolgt auf Basis der 95 %-Quantile, welche wochenweise aus den 10-Minuten-Mittelwerten errechnet werden. Wird der Messwert m eines Parameters auf den dazugehörigen Grenzwert g bezogen, lässt sich die normalisierte Qualitätsreserve q berechnen [1].

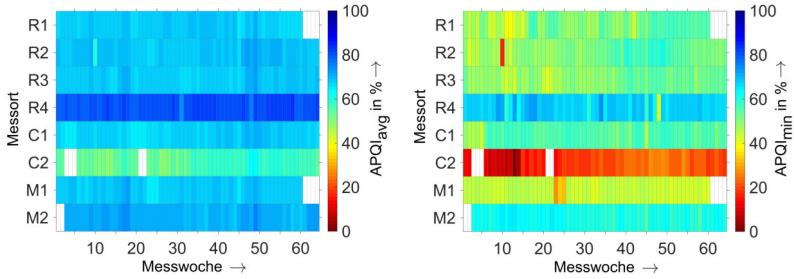
$$q = \left(1 - \frac{m}{g}\right) \cdot 100\,\% \tag{1}$$

Eine Qualitätsreserve von $q = 100\,\%$ bedeutet eine perfekte Spannungsqualität. Für $q = 0\,\%$ entspricht der gemessene Wert dem zulässigen Grenzwert (keine Reserve). Qualitätsreserven $q < 0\,\%$ sind ein Indikator für Grenzwertüberschreitungen. Insgesamt ergeben sich so für die unterschiedlichen Qualitätsparameter, die erfassten Messorte sowie die Anzahl gemessener Wochen eine Vielzahl an Qualitätsreserven. Mit Hilfe eines neu entwickelten Index, dem aggregierten Power Quality Index (APQI), lassen sich die Qualitätsreserven flexibel für verschiedene Detailstufen aggregieren. Die Aggregierung kann beispielsweise wochenweise für alle Qualitätsparameter eines Messortes oder einen Qualitätsparameter über alle Messorte erfolgen.

Die Aggregierung des APQI kann entweder durch Bestimmung des Minimums oder über eine Mittelwertbildung erfolgen. Der resultierende $APQI_{min}$ durch die Bestimmung des Minimums über alle Qualitätsreserven ermöglicht eine einfache und übersichtliche Bewertung der Spannungsqualität hinsichtlich der Einhaltung von Grenzwerten. Die Anwendung des $APQI_{avg}$ durch Verwendung der Mittelwertbildung dient dem Vergleich der mittleren Spannungsqualität zwischen

verschiedenen Verteilungsnetzen und kann bspw. zur Erstellung von Rangfolgen (Benchmarking) genutzt werden [2]. Um der ggf. unterschiedlichen Bedeutung verschiedener Qualitätsparameter an verschiedenen Messorten Rechnung zu tragen, ist eine individuelle Gewichtung verschiedener Qualitätsparameter möglich.

Die indexbasierte Bewertung der Spannungsqualität in Verteilungsnetzen wird an einem Beispiel in Bild I verdeutlicht. Insgesamt wurde die Spannungsqualität in acht verschiedenen Niederspannungsnetzen über einen Zeitraum von 64 Wochen vom September 2013 bis zum November 2014 gemessen. Die Niederspannungsnetze umfassen reine Wohngebiete mit Ein- und Mehrfamilienhaussiedlungen (Messorte R1 bis R4), Büro- und Geschäftsgebäude (C1 und C2) sowie typische Mischgebiete (M1 und M2). Der aggregierte Power Quality Index wurde mittels Mittelwertbildung ($APQI_{avg}$ in Bild Ia) und Minimum ($APQI_{min}$ in Bild Ib) für vier Qualitätsparameter (Effektivwert, Flickerpegel, Verzerrung und Unsymmetrie) berechnet. Im Ergebnis ist zu sehen, dass der Messort R4 die beste Spannungsqualität mit einer durchschnittlichen Qualitätsreserve von $APQI_{avg} > 80\,\%$ aufweist und keiner der Qualitätsparameter eine Reserve von $APQI_{min} = 40\,\%$ unterschreitet. Im Vergleich mit allen anderen Messorten zeigt sich für den Messort C2 die geringste Qualitätsreserve, welche im Mittel noch bei $APQI_{avg} > 40\,\%$ liegt, jedoch für einzelne Wochen minimale Werte von $APQI_{min} \approx 0\,\%$ erreicht. Die genauere Untersuchung des Messortes C2 ergibt, dass dies auf dessen Spannungseffektivwerte als einzigen Qualitätsparameter zurückzuführen ist.



(a) Mittelwertbildung (b) Minimum

Bild I: Wochenweise Anwendung des APQI für acht Messorte und ausgewählte Spannungsqualitätsparameter im Zeitraum von September 2013 bis November 2014; Aggregierung mittels Mittelwertbildung und Minimum

[1] E. Gasch, M. Domagk, J. Meyer, S. Abdelrahman, H. Liao und J. V. Milanovic: *Assessment of Power Quality Performance in Distribution Networks - Part 1 - Measurement Campaign and Initial Analysis*, in 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Belo Horizonte, Brasilien, 2016

[2] S. Abdelrahman, H. Liao, J. V. Milanovic, E. Gasch, M. Domagk und J. Meyer: *Assessment of Power Quality Performance in Distribution Networks - Part 2 - Performance Indices and Ranking of Network Busses*, in 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Belo Horizonte, Brasilien, 2016



Etienne Gasch, Dipl.-Ing.

ORCA - Webdatenbank zum Austausch der harmonischen und supraharmonischen Emission von Niederspannungsgeräten

Gefördert durch:
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Nichtlineare Verbraucher und Erzeuger (z. B. Ladegleichrichter für Elektrofahrzeuge, Photovoltaik-Wechselrichter) führen zu einer Verzerrung des Stromes. Durch den vermehrten Einsatz dieser Geräte beeinflussen diese maßgeblich die Spannungsverzerrung im öffentlichen Niederspannungsnetz.

Zur Erfassung der Oberschwingungsemissionen von Haushaltsgeräten wurde am Institut bereits die Webdatenbank PANDA entwickelt [1]. Diese ermöglicht einen weltweiten Austausch der harmonischen Strom- und Spannungsspektren von einphasigen Geräten kleiner 16 A, um für effizientere und zuverlässigere Oberschwingungsstudien über eine höhere Anzahl verschiedener Messungen zu verfügen. Diese Datenbank wird jetzt zur Webdatenbank ORCA mit folgenden Erweiterungen weiterentwickelt:

1. Speicherung von Supraharmonischen, sowie
2. Speicherung von Oberschwingungsemissionen bei unterschiedlicher Verzerrung der Netzspannung.

In der bestehenden Datenbank konnte die Verzerrung der Netzspannung nur qualitativ (Sinusform, Flachdach, Spitzdach) beschrieben werden. ORCA bietet jetzt die Möglichkeit der Speicherung von Fingerprints, welche die Verzerrung der Netzspannung quantitativ besser beschreibt. Beim Fingerprint-Verfahren wird zusätzlich zur Grundschwingung eine Spannungsharmonische mit veränderlichem Betrag und veränderlicher Phase eingespeist. Dadurch entstehen für jedes Testgerät zahlreiche Testpunkte. Bei der Verwendung von 12 verschiedenen Beträgen bei 12 verschiedenen Phasenwinkeln je Spannungsharmonische, ergeben sich bereits 144 Testpunkte je Spannungsharmonische. Bei der Verwendung aller ungeradzahligen Spannungsharmonischen bis 1250 Hz sind dies 1728 Testpunkte je Testgerät. Die Messdaten können wie bereits im Projekt PANDA einzeln per Direktzugriff auf eine API heruntergeladen werden. Wahlweise kann das zugehörige Spektrum sowie weitere Qualitätskenngrößen auch auf der Webseite angesehen werden.

Neu bei ORCA ist der vereinfachte Upload von allen Testpunkten mit einer Datei, wobei ein separater Upload durch mehrere Dateien, auch zum Ergänzen der Messdaten, möglich ist. Die Darstellung auf der Webseite wurde um die Fingerprints sowie die Sensitivitätsindices [2] ergänzt.
Bild I zeigt beispielhaft ein Bildschirmfoto der Webseite. Im oberen Bereich ist eine Tabelle aus Sensitivitätsindizes abgebildet. Für jede Kombination aus Strom-

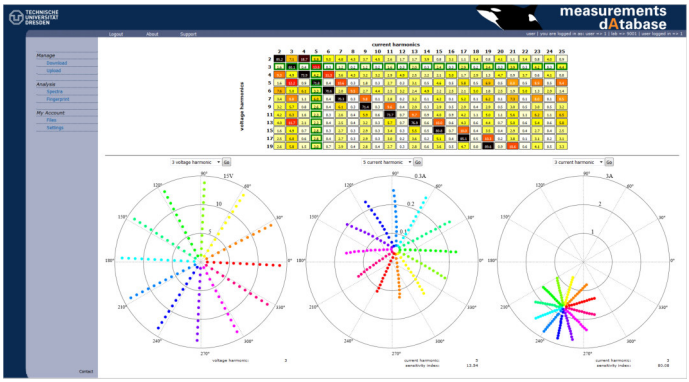


Bild I: Bildschirmfoto der Webseite mit Sensitivitätsindextabelle (oben) und Fingerprints zur 3. Spannungsharmonischen (links), 5. Stromharmonischen (mitte) und 3. Stromharmonischen (rechts) für einen Onboard-Ladegleichrichter eines Elektrofahrzeugs

harmonischen μ und Spannungsharmonischen ν wird ein Index über die jeweiligen 144 Testpunkte berechnet. Für die Berechnung des Index $S^{(\nu\mu)}$ wird eine definierte Auswahl n aus allen Testpunkten getroffen. $\underline{I}_0$ und $\underline{U}_0$ sind die Pegel bei Referenzbedingungen (sinusförmige Netzspannung).

$$S^{(\nu\mu)} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{\underline{I}_i^{(\mu)} - \underline{I}_0^{(\mu)}}{\underline{U}_i^{(\nu)} - \underline{U}_0^{(\nu)}}\right| \cdot 1000 \tag{1}$$

Der Sensitivitätsindex wird in der Darstellung farblich markiert. Durch einen Mausklick auf einen der Indizes werden im unteren Bereich der Webseite die dazugehörigen Fingerprints angezeigt. Der linke Fingerprint zeigt die Spannungsharmonischen der gewählten Ordnung für alle unterschiedlichen Beträge und Phasenwinkel (hier 144 Testpunkte). Im mittleren Diagramm werden die zugehörigen Stromharmonischen einer beliebig gewählten Ordnung dargestellt. Im rechten Diagramm ist der Fingerprint für die Stromharmonischen gleicher Ordnung zu sehen.

[1] A. M. Blanco, E. Gasch, J. Meyer, and P. Schegner, *Web-based platform for exchanging harmonic emission measurements of electronic equipment*. IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP, Hong Kong, 2012.

[2] S. Müller, J. Meyer, and P. Schegner, *Characterization of small photovoltaic inverters for harmonic modeling*. IEEE 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP, Bukarest, 2014.



Matthias Klatt, Dipl.-Ing.

Charakterisierung der Emission von Photovoltaik-Wechselrichtern im Frequenzbereich 2 bis 150 kHz

Die steigende Nutzung moderner, leistungselektronischer Geräte, sowie leitungsgeführter Kommunikation im Niederspannungsnetz hat zu einer Zunahme der Spannungs- und Stromverzerrung im Frequenzbereich zwischen 2 und 150 kHz (supraharmonisch) geführt. Die Emission kann in beabsichtigte Emission, beispielsweise durch die genannte leitungsgeführte Kommunikation (power line communication - PLC), und unbeabsichtigte Emission unterschieden werden, beispielsweise verursacht durch Photovoltaik-Wechselrichter (PV-WR).

Im Labor des IEEH wurde ein handelsüblicher und weit verbreitet eingesetzter Wechselrichter auf seine supraharmonische Emission und deren Einflussfaktoren hin untersucht. Der schematische Versuchsaufbau, mit dem die Untersuchung durchgeführt wurde, ist im Bild I dargestellt.

Die supraharmonische Emission von PV-WR lässt sich in Emissionsbändern um die Vielfachen der Schaltfrequenz f_s zusammenfassen.

$$U^{Bk} = \sqrt{\frac{1}{B}\int_{k\cdot f_s-\frac{B}{2}}^{k\cdot f_s+\frac{B}{2}} |\underline{U}(f)|^2 \, \mathrm{d}f} \qquad (1)$$

Als günstig hat sich die Bewertung der Spannung des ersten Emissionsbandes $k = 1$ an den Klemmen des Wechselrichters (point of connection - POC) mit einer Bandbreite von $B = 800$ Hz herausgestellt [1].

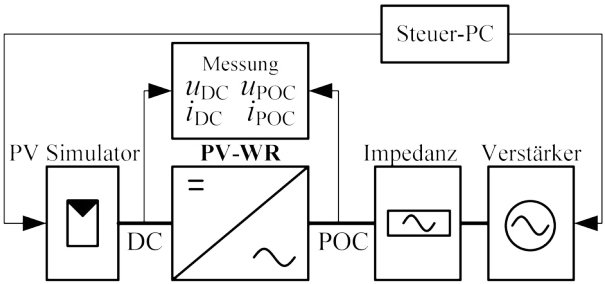


Bild I: Schematischer Versuchsaufbau

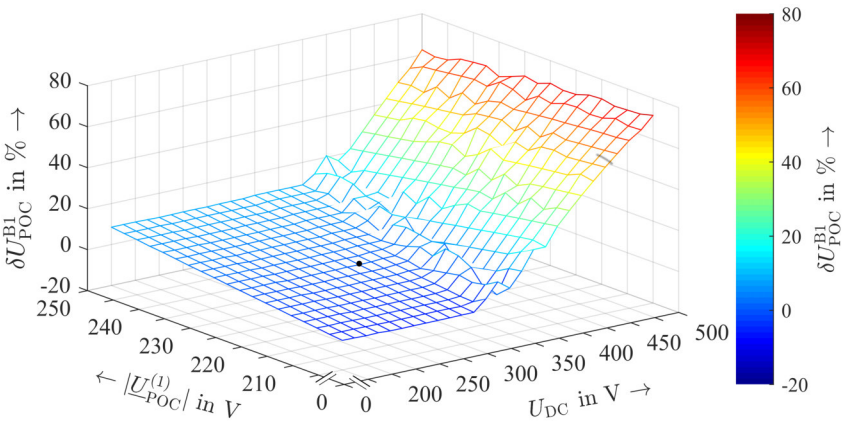


Bild II: Relative Änderung der supraharmonischen Emission des untersuchten Wechselrichters in Abhängigkeit von der Höhe der Gleich- und Wechselspannung

In den Versuchsreihen wurde der Einfluss der Höhe der Wechsel- und Gleichspannung, der abgegebenen Wirkleistung, der niederfrequenten Spannungsverzerrung auf der Netzseite, sowie der Netzfrequenz untersucht. Im Bild II ist die Abhängigkeit der supraharmonischen Spannungsverzerrung δU^{B1}_{POC} von der Höhe der Grundschwingung der Wechselspannung am Anschlusspunkt $U^{(1)}_{POC}$ und Gleichspannung U_{DC} dargestellt. Dabei zeigen sich zwei Bereiche, welche durch die Struktur und Funktionsweise des Wechselrichters begründet sind. Bei geringen Gleichspannungen hält der eingebaute Hochsetzsteller die Zwischenkreisspannung auf einem gleichbleibend hohen Wert, wodurch die supraharmonische Verzerrung am Anschlusspunkt ebenfalls konstant bleibt. Bei hohen Gleichspannungen ist der Hochsetzsteller inaktiv und die supraharmonische Verzerrung am Anschlusspunkt nimmt etwa proportional zur Höhe der Gleichspannung zu.

Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass keine Abhängigkeit von der Netzfrequenz besteht und dass die Abhängigkeit von der niederfrequenten Spannungsverzerrung vernachlässigbar ist. Die Abhängigkeit von der abgegebenen Wirkleistung ist gering, jedoch insbesondere bei Betrieb mit Bemessungsleistung nicht vernachlässigbar.

Weitere Details zu den Ergebnissen der Untersuchung, auch für weitere Wechselrichter, finden sich in [2].

[1] M. Klatt, et.al. *Emission levels above 2 khz - laboratory results and survey measurements in public low voltage grids*, 22nd International Conference on Electricity Distribution CIRED, Stockholm, 2013

[2] M. Klatt, et.al. *Characterization of supraharmonic emission caused by small photovoltaic inverters*. Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower), Belgrad, 2016



Jan Meyer, Dr.-Ing.

Survey on International Practice of Calculating Harmonic Current Emission Limits

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

The limitation of harmonic currents emitted by individual equipment and customer installations is essential in order to maintain harmonic voltages below compatibility or planning levels and consequently to ensure Electromagnetic Compatibility (EMC). At present a large variety of methods exists worldwide for calculating harmonic emission limits, majorly expressed as harmonic currents. As starting point for the revision of the methods currently used in Germany, a systematic search on available methods has been performed for more than 70 countries from all over the world. While some countries have very specific and detailed rules for allocating harmonic current emission limits, other countries do only provide voltage harmonic limits for the whole network or do not define any rules at all. Finally 18 methods to calculate harmonic current emission limits have been identified and compared.

At this stage the comparison is still qualitative and is based on a set of characteristics with predefined answers was performed. Three categories, namely general characteristics, method-related characteristics and network-related characteristics have been introduced. The respective feature sets are summarized in Table I.

Table I: Sets of characteristics for the comparison categories

General	Method-related	Network-related
G1: Voltage level	M1: Frequency range	N1: Network impedance
G2: Type of installation	M2: Summation of multiple installations	N2: Network topology
G3: Type of limits	M3: Allocation principle	
G4: Reference to popular standard	M4: Number of input parameters	

Key results for general characteristics:

Most standards apply for more than only one voltage level and often cover the full range from LV to HV. The majority of the selected methods is both applicable for generators and consumers and among those, most of them provide equal treatment. In case of unequal treatment, limits are usually more stringent for

generators. Storage devices, which can be operated as generator or consumer, have not been specifically addressed in any of the documents yet. All methods provide harmonic current limits for individual customer installations, which are calculated based on its agreed power and the short circuit power at the connection point.

Key results for method-related characteristics:

70 % of the methods have an upper frequency limit of 2/2.5 kHz. Only five methods, mostly dedicated to generating installations, provide already emission limits above 2/2.5 kHz, usually up to 9 kHz. No method contains limits for frequencies higher than 9 kHz yet. The majority of the methods requires between two and five input parameters, which keeps simplicity and practicability of the methods at an acceptable level.

Key results for network-related characteristics:

The current harmonic limits are derived based on assumptions about allowable contributions to the harmonic voltage levels, which consequently requires accurate knowledge of the network harmonic impedance. Three methods are independent from network harmonic impedance. Four methods consider only the simplified approach $h \cdot Z_{sc}$, which results in erroneous impedance values particular in case of resonances and low X/R ratios.

The qualitative comparison has shown that the differences between the methods can be significant. For any of the methods the quality of the input data is a crucial issue. The final accuracy of more complex methods compared to simpler ones might be only illusive as long as the necessary input data are not sufficiently reliable. The novel development tendencies in the networks result in several is-sues, which are not yet properly addressed in the present methodologies. Namely these are (1) the inclusion of generating and storage installations in the calculation of the total connection capacity, (2) the equal vs. non-equal treatment of the different types of installation (consumption, generation, storage), (3) the extension of the considered frequency range up to 150 kHz and (4) the consideration of harmonic phase angles for determining the diversity between different installa-tions. All mentioned aspects has to be considered in the ongoing activities in revising existing or developing new standards and guidelines and assessment methodologies at national and international level.

The next steps within this project are a comprehensive comparison of the identified methods by probabilistic simulations and the improvement of the existing allocation methods in the German rules for network disturbance assessment. Methods for the assessment of the contribution of an individual customer installation are also considered.

[1] J. Meyer et. al.: *Survey on International Practice of Calculating Harmonic Current Emission Limits*, 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), October 2016, Belo Horizonte, Brasil.



Friedemann Möller, Dipl.-Ing.

Neuer Ansatz zur Berechnung von Grenzwerten für unsymmetrische Anlagen zum Anschluss an das Niederspannungsnetz

In Folge des vermehrten Einsatzes unsymmetrischer und leistungselektronischer Anlagen und Geräte im Niederspannungsnetz kann es zu unerwünschten Rückwirkungen auf die Netzspannung kommen, welche wiederum negativen Einfluss (z. B. Funktionsausfall) auf angeschlossene Geräte im Netz haben können. Zur Gewährleistung der Einhaltung einer angemessenen Elektroenergiequalität in öffentlichen elektrischen Netzen enthalten verschiedene nationale bzw. internationale Regelwerke Verfahren zur Bestimmung entsprechender Grenzwerte. Im Hinblick auf den Anschluss unsymmetrischer Anlagen an das Niederspannungsnetz sind diese oftmals sehr stark vereinfacht. Die zur Berechnung des erlaubten unsymmetrischen Anteils einzusetzende Anlagenleistung ist nicht klar definiert.

Um die angesprochenen Unzulänglichkeiten zu beheben wurde für die aktuell in Bearbeitung befindliche D-A-CH-CZ Richtlinie zur Beurteilung von Netzrückwirkungen ein neues Verfahren zur Bewertung der Grenzwerte für unsymmetrische Anlagen zum Anschluss an das Niederspannungsnetz entwickelt. Dabei werden Abnehmer-, Speicher- und Erzeugungsanlagen gleich bewertet und die Aufteilung eines zulässigen unsymmetrischen Leistungsanteils erfolgt proportional zur vereinbarten Anschlussleistung des Kunden analog dem Grundprinzip für die Zuteilung der Oberschwingungsgrenzwerte.

Ausführliche analytische und probabilistische Vergleiche mit anlagen- und netzbezogene Simulationen im Vergleich zum aktuellen Verfahren nach D-A-CH-CZ (2. Ausgabe) zeigen, dass das neue Bewertungsverfahren insbesondere an Anschlusspunkten mit höherer Kurzschlussleistung realistischere Grenzwerte liefert, wodurch die Aufnahmefähigkeit der Netze für unsymmetrische Kundenanlagen verbessert wird.

Das Bewertungsverfahren ist zweistufig aufgebaut und basiert auf der Berechnung einer unsymmetrischen Anlagenleistung, welche sich unter Berücksichtigung der komplexen Strangleistungen wie folgt ergibt

$$S_{Au} = \left| \underline{S}_{L1} + \underline{a} \cdot \underline{S}_{L2} + \underline{a}^2 \cdot \underline{S}_{L3} \right| \qquad (1)$$

Der neue Ansatz ist im Folgenden dargestellt.

Marginalkriterium

Für Abnehmer- und Erzeugungsanlagen ist eine minimale unsymmetrische Anlagenleistung von

$$S_{\mathrm{Au}} \leq 3{,}7\,\mathrm{kVA} \tag{2}$$

genehmigungsfrei an jedem Anschluss zulässig. Diese Leistung entspricht einem Strom von rund 16 A, welcher über handelsübliche Sicherungsautomaten in heutigen Haushalten abgesichert ist und somit in guter Näherung der unsymmetrischen Leistung eines Haushaltes entspricht.

Stufe 1

Ist der unsymmetrische Anteil der Anlagenleistung im Verhältnis zur Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt gering genug, kann die Anlage ohne weitere Beurteilung angeschlossen werden.

$$\frac{S_{\mathrm{Au}}}{S_{\mathrm{kV}}} \leq 0{,}2\,\% \tag{3}$$

Stufe 2

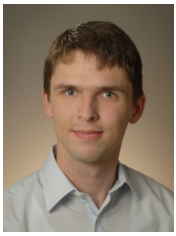
Bei größerem Verhältnis von unsymmetrischem Anteil der Anlagenleistung zur Kurzschlussleistung ist der maximal zulässige Gegensystemstrom zum Anlagenstrom wie folgt zu berechnen.

$$k_{2\mathrm{max}} = \left.\frac{I_2}{I_{\mathrm{A}}}\right|_{\mathrm{max}} = \frac{s}{1000} \cdot \sqrt{\frac{S_{\mathrm{kV}}}{S_{\mathrm{A}}}} \tag{4}$$

Dabei entspricht s dem Netztopologiefaktor, welcher neben der Leitungslänge und der Gleichmäßigkeit der verschiedenen Abgänge auch vom Transformator und dem zulässigen Gesamtstöreintrag im Niederspannungsnetz durch angeschlossene Anlagen abhängt. Es ist darauf zu achten, dass in der Gleichung die dreiphasige beantragte Anlagenleistung S_{A} sowie der daraus resultierende Anlagenstrom I_{A} einzusetzen ist. Tabelle I gibt Richtwerte dieses Faktors für typische Niederspannungsnetze an.

Tabelle I: Richtwert für s in Abhängigkeit der Netztopologie

Netztopologie	s
Lange Leitungen / ungleiche Länge der Abgänge z. B. ländliches Gebiet	12
Mittellange Leitungen / gleiche Länge der Abgänge z. B. Stadtrand	25
Kurze Leitungen / gleiche Länge der Abgänge z. B. Stadt	40



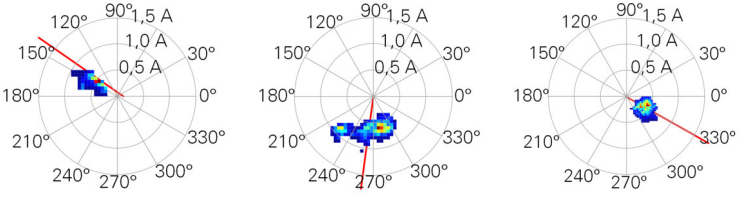
Sascha Müller, Dipl.-Ing.

Auswirkungen einer hohen Durchdringung von PV-Anlagen auf die Spannungsqualität in einem Niederspannungsnetz

Gefördert durch:
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

In den letzten Jahren ist die Zahl der im Niederspannungsnetz installierten PV-Anlagen in Deutschland stark angewachsen. Der Anschluss dieser Anlagen erfolgt dabei über Wechselrichter, die aufgrund ihrer Schaltungstopologie eine nichtlineare Kennlinie besitzen und somit zu einer Verzerrung des eingespeisten Stromes führen. In Abhängigkeit dieser so erzeugten Stromharmonischen und der Netzimpedanz am Anschlusspunkt kann dies einen Einfluss auf die Spannungsverzerrung im Netz haben. Um dies zu untersuchen, wurde für eine Feldstudie ein Niederspannungsnetz in Österreich ausgewählt, in dem nahezu jeder zweite Haushalt eine PV-Anlage besitzt und sich somit eine weit überdurchschnittliche Durchdringung ergibt [1].

Neben der Messung der Spannungs- und Stromharmonischen an den Abgängen des einspeisenden Transformators war es auch möglich, einzelne Haushalte sowie einen Wechselrichter separat zu messen. Diese Einzelmessung ermöglicht eine grundsätzliche Charakterisierung des Oberschwingungsverhaltens und lässt sich auch auf die anderen Wechselrichter übertragen, da diese zum großen Teil vom gleichen Hersteller gefertigt wurden. In Bild I sind die Verteilungen der 3., 5. und 7. Stromharmonischen über einen Zeitraum von einer Woche in jeweils einem Polardiagramm dargestellt, wobei höhere Datendichten rot markiert sind. Außerdem ist durch eine rote Linie der jeweilige Vorzugswinkel gekennzeichnet. Es lässt sich erkennen, dass die Variation der dargestellten Harmonischen eher gering ist. Hinsichtlich des Betrages ist die 5. Stromharmonische mit maximal 1 A am stärksten ausgeprägt.



(a) $I^{(3)}$ (b) $I^{(5)}$ (c) $I^{(7)}$

Bild I: Charakterisierung eines einzelnen PV-Wechselrichters

Um die Auswirkungen der Wechselrichter im Netz zu untersuchen, wird für die Spannungsverzerrung ein Messpunkt am Ende desjenigen Abgangs gewählt, in

dem die größte PV-Leistung installiert ist. An dieser Stelle kann der Effekt der PV-Anlagen am deutlichsten beobachtet werden. Außerdem wird die entsprechende Verzerrung des Stromes betrachtet, wobei dazu der Oberschwingungsstrom des gesamten Netzes herangezogen wird. Um auch den direkten Vergleich zu dem Zustand ohne PV-Einspeisung zu haben, werden die entsprechenden Spektren über einen kompletten Tag ausgewertet. Gewählt wurde dabei ein sonniger Tag mit viel PV-Einspeisung. II und III zeigen die entsprechenden Spektren, wobei jeweils der Leiter L1 dargestellt ist.

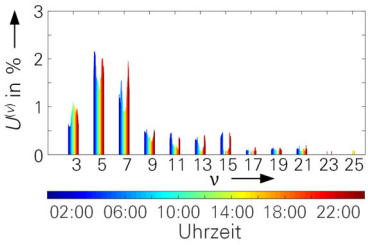


Bild II: Spannungsverzerrung

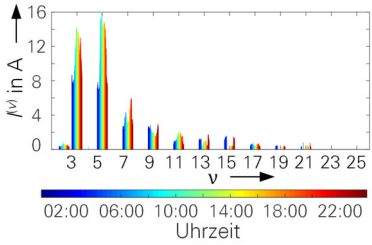


Bild III: Stromverzerrung

Bemerkenswert ist, dass mit Ausnahme der 3. Spannungsharmonischen eine erkennbare Absenkung der Spannungspegel während des Betriebs der PV-Anlagen festzustellen ist. Insbesondere die 15. Harmonische, welche sich während der Nacht bereits nahe an ihrem Grenzwert befindet, wird stark reduziert. Bei Betrachtung der Stromverzerrung ergibt sich ein differenziertes Bild. Während die 3., 5., 7. und 11. Harmonische am Tage ansteigen, verringern sich die Pegel der 9., 13. und 15. Harmonischen. Diese Reduktion lässt sich auf Auslöschungseffekte mit anderen gleichzeitig angeschlossenen Geräten zurückführen (*primary cancellation*). Die Verringerung von insbesondere der 5. und 7. Spannungsharmonischen wird hingegen dadurch verursacht, dass die Oberschwingungsemission der PV-Wechselrichter der bereits existierenden Vorverzerrung des Netzes entgegenwirkt (*secondary cancellation*). Im Falle der 3. Harmonischen gibt es jedoch kaum eine vom vorgelagerten Netz übertragene Vorverzerrung, weshalb es auch nicht zu einer Kompensation kommen kann. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in dem betrachteten Netz die PV-Wechselrichter einen insgesamt positiven Einfluss auf die Spannungsharmonischen haben. Bei veränderten Vorzugswinkeln der bereits ohne PV-Anlagen im Netz existierenden Spannungsharmonischen oder bei Verwendung von PV-Wechselrichtern anderen Typs könnte sich jedoch ein völlig anderes Bild ergeben. Eine allgemeingültige Aussage lässt sich deshalb anhand dieser Feldstudie noch nicht formulieren.

[1] S. Müller, J. Meyer, F. Möller, M. Naumann, M. Radauer *Impact of a High Penetration of Electric Vehicles and Photovoltaic Inverters on Power Quality in an Urban Residential Grid, Part II - Harmonic Distortion*. ICREPQ, Madrid, 2016.



Robert Stiegler, Dipl.-Ing.

Einfluss von Photovoltaik-Anlagen auf die frequenzabhängige Netzimpedanz

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 wird nicht nur von den Netzelementen, wie z. B. Transformatoren und Leitungen, bestimmt, sondern bei höheren Frequenzen auch stark von den am Netz angeschlossenen Verbrauchern und Erzeugern.

Zur Verifizierung dieses Einflusses wurde die frequenzabhängige Netzimpedanz am Anschlusspunkt einer Photovoltaik (PV)-Anlage in verschiedenen Schaltzuständen der PV-Anlage gemessen. Bild I zeigt den Netzplan der PV-Anlage. Die PV-Anlage befindet sich auf dem Dach eines kombinierten Lager- und Bürogebäudes mit eigenem MS/NS-Transformator. Die PV-Anlage besteht aus 15 gleichartigen einphasigen 6,65 kW-Wechselrichtern welche auf ca. 4,2 kW gedrosselt sind. Die PV-Wechselrichter sind in 5 Abgängen gleichmäßig auf die Außenleiter verteilt. Die PV-Wechselrichter wurden schrittweise vom Netz getrennt und die Schleifenimpedanz wurde mit dem am IEEH entwickelten Netzimpedanzmesssystem [1] zwischen einem Außenleiter und dem Neutralleiter gemessen.

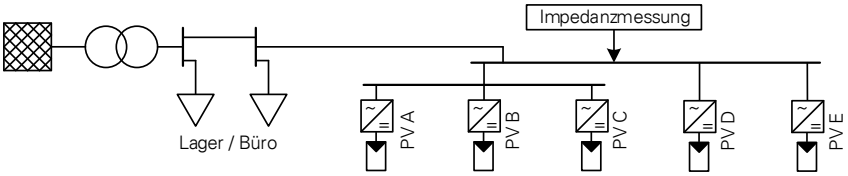


Bild I: Single-line Diagramm des untersuchten Netzes

Bild II zeigt den Betrag der frequenzabhängigen Netzimpedanz in zwei verschiedenen Frequenzbereichen für die verschiedenen Schaltzustände. Für alle Schaltzustände ist eine Resonanzüberhöhung bei ca. 800 Hz vorhanden. Diese Resonanz wird vermutlich durch den Transformator und die weiteren Verbraucher im Gebäude bestimmt, da sie nicht durch die Anzahl der zugeschalteten PV-Wechselrichter beeinflusst wird.

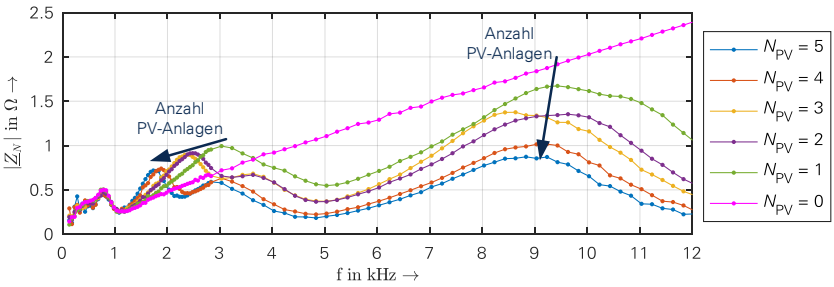


Bild II: Schleifenimpedanz für unterschiedliche Anzahl von PV-Anlagen

Ohne angeschlossene PV-Wechselrichter steigt die Impedanz linear mit der Frequenz. Es sind keine weiteren Resonanzen vorhanden. Sobald mindestens ein PV-Wechselrichter zugeschaltet ist, ergeben sich im betrachteten Frequenzbereich zwei weitere Resonanzmaxima welche in ihrer Resonanzüberhöhung und ihrer Frequenz von der Anzahl der zugeschalteten PV-Wechselrichter abhängig sind. Die Frequenz des ersten zusätzlichen Resonanzmaximums verschiebt sich deutlich von 3 kHz bei einem PV-Wechselrichter hin zu 1,75 kHz bei fünf PV-Wechselrichtern. Die Ursache hierfür das kapazitive Verhalten der Filterkreise der PV-Wechselrichter. Durch die Vergrößerung der Kapazität verringert sich die Resonanzfrequenz.

Beim zweiten zusätzlichen Resonanzmaximum verringert sich die Frequenz nicht so stark bzw. nicht so deutlich (von 9,5 kHz auf 8,8 kHz), da die Resonanz über eine geringe Güte verfügt und die Resonanzüberhöhung entsprechend breit ist. Allerdings wird diese zweite Überhöhung stark durch die Anzahl der zugeschalteten PV-Wechselrichter gedämpft.

Durch diese Messung kann gezeigt werden, welche Bedeutung am Netz angeschlossene Verbraucher und Erzeuger für die Netzimpedanz haben. Durch die abhängig von den zugeschalteten PV-Wechselrichtern veränderliche Resonanzfrequenz können sich beispielsweise bei gleichbleibender Störaussendung (harmonischer Strom) deutlich verschiedene Störpegel in der harmonischen Spannung ergeben. Dies sollte bei der Bestimmung von Emissionsgrenzwerten und der Bewertung der Emission von Kundenanlagen berücksichtigt werden.

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



Olga Zyabkina, M.Eng.

Classification and Identification of Anomalies in Time Series of Power Quality Measurements

As the amount of available Power Quality (PQ) data increases fast, methods for an automated extraction of useful information from the data become more and more important. One particular aspect is the detection of „atypical" behaviour within PQ time series. Such deviations from „typical" behaviour are referred to as anomalies and can provide useful information to the network operators.

An essential basis for the development of automatic identification algorithms is exact knowledge about the character of anomalies. Therefore, based on an exploratory analysis of a large amount of measurement data for different PQ parameters and for different sites a classification scheme of three primary features with three qualitative categories is proposed: level of deviation, shape and slope.

The level of deviation describes the difference between the magnitudes of anomalous data compared to an average value representing the typical daily behaviour and can be qualified as high, medium or low [1].

The shape refers to the time characteristic of an anomaly and divided into three categories: single value, multiple oscillating values and multiple consecutive values.

The slope of an anomaly describes the change between consecutive values of an anomaly compared to the average rate of change in the typical data. Again, three categories of the slope are distinguished: high, medium or low.

In general, a single method is not sufficient to perfectly identify all different kinds of anomalies. The method presented in this project is dedicated to anomalies with high slopes and all levels of the deviation. Regarding the shape it is the most suitable for anomalies consisting of single values. In order detect such anomalies in time series of PQ parameters a two-step approach is proposed.

In the first step, the typical daily variation is removed up to a certain level from the time series by applying LOWESS, fig. I. Based on the recommendation in [2] and the explorative analysis the smoothing parameter $f = 0.7$ was selected.

In the second step, the empirical defined thresholds are used to detect the anomalies within the remaining time series, fig. II. The most promising thresholds, which were selected are calculated based on robust against anomalies 25th and 75th percentile and interquartile range (IQR). Different weekly time series that are typical for LV networks are used in order to determine the performance of the method. Synthetic "single-value" anomalies of different number and the level of the deviation have been randomly added in the time series.

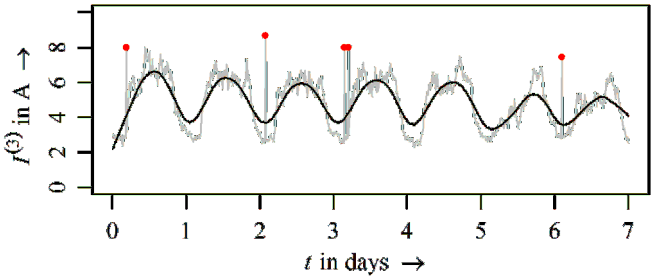


Figure I: Weekly time series of the 3rd harmonic current (grey) for a mixed area of residential and offices with synthetically implemented single-value anomalies (red dots); Smoothed component (black)

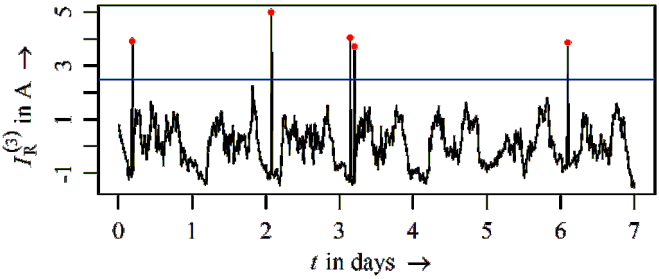


Figure II: Remainder time series of the 3rd harmonic current (black) of fig. I after pre-processing using LOWESS; Upper limit based on IQR method (blue) with highlighted single-value anomalies (red dots)

The performance of the method has been evaluated based on the time series with synthetically added as well as real measured anomalies using two indices precision p and recall r ratios.

For the percentage of anomalies $c < 15\,\%$ and the level of deviation $d > 1.5$ the method achieves the 100 % efficiency. The results confirm that the type of time series has the most dominant impact on the performance of the proposed method.

[1] O. Zyabkina, M. Domagk, J. Meyer and P. Schegner, *Classification and Identification of Anomalies in Time Series of Power Quality Measurements*, IEEE PES ISGT Innovative Smart Grid Technologies, Ljubljana, Slovenia, 2016.

[2] W. Cleveland, *Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots*, Journal of the American Statistical Association, vol. 74, no. 368, 1979.

Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Schutz- und Leittechnik“

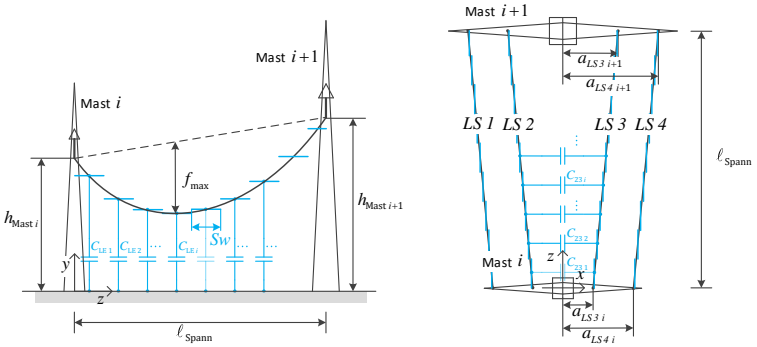


Carlo Liebermann, Dipl.-Ing.

Untersuchung der Einflüsse auf den Lichtbogen bei einer einpoligen AWE

Durch die kapazitiv eingekoppelte Spannung während einer AWE-Pause kann es zu einem Weiterbrennen des Lichtbogens (secondary arc) kommen.

Dies wird anhand eines Freileitungsmodells durch die Nachbildung der Leitungsgeometrie einer realen Freileitungsstrecke untersucht. Bei der Modellierung der Leiterseile werden diese zur Nachbildung der Geometrie als Teilleiter endlicher Länge auf den Seilkoordinaten nachgebildet.



(a) Ansicht aus der y-z-Ebene (b) Ansicht aus der x-z-Ebene

Bild I: Leitungsmodellierung

Ausgehend vom Feldvektor der elektrischen Feldstärke $\underline{\boldsymbol{E}}$ der jeweiligen Teilleiter wird das Potential $\varphi(\boldsymbol{r})$ im betrachteten Raumpunkt $\boldsymbol{r}$ bestimmt. Die einzelnen Kapazitäten lassen sich aus der resultierenden Potentialkoeffizientenmatrix $\boldsymbol{P}$ bestimmen. Dabei werden geerdete und/oder isolierte Leiter im Beeinflussungsbereich bei der Kapazitätsberechnung berücksichtigt. Die resultierende Kapazitätskoeffizientenmatrix $\boldsymbol{K} = \boldsymbol{P}^{-1}$ berechnet sich aus der Summe der Teilkapazitäten, wobei die Phasenfolge der Verdrillung durch Permutationsmatrizen Beachtung findet.

Der Vergleich berechneter und gemessener Kapazitäten bestätigt eine sehr hohe Modellgenauigkeit. Die Abweichungen liegen im Bereich weniger Prozent.

Je nach fehlerbetroffener Phase lässt sich die eingekoppelte Spannung mit Hilfe der Kapazitätskoeffizientenmatrix $\boldsymbol{K}$ bzw. deren Elementen K_{ij} bestimmen.

$$\underline{U}_{\mathrm{L}i\mathrm{E}} = -\sum_{\tau=1}^{n} \underline{U}_{\mathrm{L}\tau\mathrm{E}} \cdot \frac{K_{\mathrm{Ges}\,i\tau}}{K_{\mathrm{Ges}\,ii}} \tag{1}$$

Bei Einführung eines Lichtbogenwiderstandes R_{LB} lässt sich der Fehlerstrom berechnen:

$$\underline{I}_{f\mathrm{E}} = \sum_{\tau=1}^{n} \frac{\underline{U}_{\mathrm{L}\tau\mathrm{E}}}{\dfrac{\mathrm{j}}{\omega \cdot K_{f\tau}} + R_{\mathrm{LB}} \left\| \dfrac{\mathrm{j}}{\omega \cdot \left(\sum\limits_{k=1}^{n} K_{fk} - \sum\limits_{l=1}^{n} K_{fl} \right)} \right.} \qquad \forall \tau \neq f \qquad \forall k \neq f, \tau \tag{2}$$

Anhand der aufgestellten Gleichungen konnten zudem folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

1. Die von der kapazitiven Verkettung eingekoppelte Spannung ist von der Länge der Leitung unabhängig. Ausschlaggebend dafür ist die Mastkopfgeometrie
2. Der im Falle eines Erdfehlers durch die eingekoppelte Spannung in der AWE-Pause fließende Strom ist abhängig von der Länge der Leitung.
3. Der Grenzwert des gegen Erde abfließenden Stromes im betrachteten Leiter bei einem unendlich großen Lichtbogenwiderstand entspricht dem Anteil des durch die Leiter-Erd-Kapazität abfließenden Stromes.

$$\underline{I}_{f\mathrm{E\,kap}} = \lim_{R_{\mathrm{LB}} \to \infty} \underline{I}_{f\mathrm{E}} = \mathrm{j}\omega \sum_{\tau=1}^{n} \frac{\underline{U}_{\mathrm{L}\tau\mathrm{E}} \cdot K_{f\tau} \cdot \left(\sum\limits_{l=1}^{n} K_{fl} - \sum\limits_{k=1}^{n} K_{fk} \right)}{K_{f\tau} + \sum\limits_{k=1}^{n} K_{fk} - \sum\limits_{l=1}^{n} K_{fl}} \tag{3}$$

$$\forall \tau \neq f \qquad \forall k \neq f, \tau$$

4. Der Vergleich des Stromes $\underline{I}_{f\mathrm{E\,kap}}$ mit $\underline{I}_{f\mathrm{E}}$ bei metallischem Fehler verdeutlicht zudem, dass der Lichtbogenwiderstand keinen signifikanten Einfluss auf den gegen Erde abfließenden Strom hat.
5. Durch die Erhöhung der Leiter-Erde-Kapazitäten des Systems durch Anbindung einer Kabelstrecke kann die eingekoppelte Spannung reduziert werden, sodass ein möglicher secondary arc nicht entstehen kann.

Weiterhin wurden anhand des Modells verschiedene Schaltungsvarianten untersucht um die eingekoppelte Spannung zu erhöhen. Durch einen Vergleich mit Messwerten aus bekannten Störschrieben konnten die Berechnungsergebnisse validiert werden.



Jörg Meyer, Dr.-Ing.

Fehlerortung auf gemischten Kabel-Freileitungsstrecken

Die elektrische Energieübertragung erfolgt immer häufiger auch in 220- und 380-kV-Netzen nicht mehr ausschließlich über reine Kabel- oder Freileitungsverbindungen. Immer öfter werden gemischte Kabel-Freileitungsverbindungen zur Energieübertragung genutzt. Der Schutz derartiger Übertragungsstrecken soll u. a. mit Distanzschutzgeräten erfolgen. Die stark unterschiedlichen Parameter der Kabel- und Freileitungsanteile haben Auswirkungen auf die Genauigkeit der Distanzbestimmung und damit der Zonenzuordnung der eingesetzten Distanzschutzgeräte.

Die konventionellen Methoden der Distanzbestimmung im Schutzrelais erfolgt über die Berechnung der Mitsystemimpedanz der Fehlerschleife. Auf Grund der geringen geometrischen Abmessungen von Kabelstrecken, ergeben sich sehr geringe Mitsystem- und Nullsystemimpedanzen. Dies erschwert die genaue Fehlerortung erheblich. Eine Unterscheidung zwischen Fehlerort 2 und Fehlerort 3 ist auf Basis der Bewertung der Mitsystemimpedanz, auch bei langen Kabelstrecken, kaum möglich.

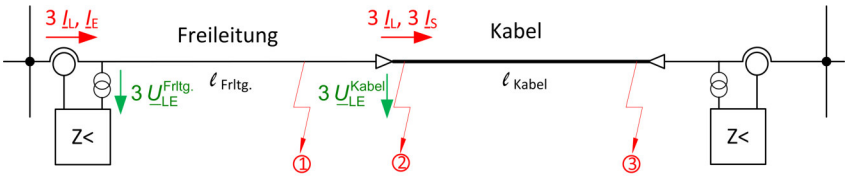


Bild I: Gemischte Kabel-Freileitungsstrecke

Fehlerortung auf der Freileitung:

Die Berechnung der Mitsystemimpedanz auf der Freileitung kann für Leiter-Erde Fehler im Leiter L1 mit der bekannten Gleichung erfolgen:

$$\underline{Z}'_1 \, \ell_k = \frac{\underline{U}_{L1E}}{\underline{I}_{L1} - \underline{I}_E \, \underline{k}_E} \qquad (1)$$

Fehlerortung für Einleiterkabel mit geerdeten Kabelschirmen:

Durch die Verwendung von i. d. R. einzeln geschirmten Einleiterkabeln, mit beidseitig geerdeten Kabelschirmen, ergibt sich eine fehlerentfernungsabhängige Schirmstromaufteilung. Dadurch ist eine Fehlerortbestimmung nach Gleichung (1)

sehr ungenau. Eine verbesserte Fehlerortung könnte durch Verwendung der Impedanzmatrix im natürlichen System erreicht werden. Hierbei sind $\underline{Z}_{LnLn}$ bzw. $\underline{Z}_{SnSn}$ die Selbstimpedanzen von Leiter bzw. Schirm, $\underline{Z}_{LnLm}$ die gegenseitigen Leiterimpedanzen und $\underline{Z}_{LnSn}$ und $\underline{Z}_{LnSm}$ die Leiter-Schirmimpedanzen gleicher bzw. unterschiedlicher Leiter. Eine fehlerentfernungsabhängige Impedanz ergibt sich über:

$$\left(\underline{Z}'_{L1L1} - \underline{Z}'_{S1L1}\right) \ell_k = \frac{\underline{U}_{L1E}}{\underline{I}_{L1} - \dfrac{\underline{Z}'_{S1S1} - \underline{Z}'_{L1S1}}{\underline{Z}'_{L1L1} - \underline{Z}'_{S1L1}} \underline{I}_{S1}} = \underline{Z}'_F \ell_k = \frac{\underline{U}_{L1E}}{\underline{I}_{L1} - \underline{k}_{S1} \underline{I}_{S1}} \tag{2}$$

Die Ähnlichkeit der Berechnungsgleichungen (1) und (2) ist erkennbar. Allerdings ist bei der Berechnung nach Gleichung (2) eine Messung des Schirmstromes $\underline{I}_{S1}$ erforderlich (Dieser kann *nicht* wie der Erdstrom $\underline{I}_E$ berechnet werden). Mit Kenntnis der vollständigen Impedanzmatrix der Kabelstrecke:

$$\begin{pmatrix} \Delta \underline{\boldsymbol{u}}_L \\ \Delta \underline{\boldsymbol{u}}_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{\boldsymbol{Z}}_{LL} & \underline{\boldsymbol{Z}}_{LS} \\ \underline{\boldsymbol{Z}}_{SL} & \underline{\boldsymbol{Z}}_{SS} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{\boldsymbol{i}}_L \\ \underline{\boldsymbol{i}}_S \end{pmatrix} \tag{3}$$

lässt sich der am Anfang der Kabelstrecke fließende Schirmstrom über folgende Gleichung aus den gemessenen Leiterströmen berechnen:

$$\begin{pmatrix} \underline{I}_{S1} \\ \underline{I}_{S2} \\ \underline{I}_{S3} \end{pmatrix}^L = \underline{\boldsymbol{\Gamma}} \cdot \ell_k \cdot \underline{\boldsymbol{i}}_L^L + \underline{\boldsymbol{\Gamma}} \cdot (1 - \ell_k) \cdot \underline{\boldsymbol{i}}_L^R - \left(\boldsymbol{E} - \boldsymbol{\Xi}\right) \cdot \underline{\boldsymbol{i}}_F \quad \text{mit} \quad \underline{\boldsymbol{\Gamma}} = -\left(\underline{\boldsymbol{Z}}'_{SS}\right)^{-1} \cdot \underline{\boldsymbol{Z}}'_{SL} \tag{4}$$

Damit werden die durch Induktion hervorgerufenen Anteile des Schirmstromes und die Aufteilung des Fehlerstromes $\underline{\boldsymbol{i}}_F$ auf die Schirme berücksichtigt. Es ergibt sich eine quadratische Gleichung für die Fehlerentfernung ℓ_k der betroffenen Schleife L1-E:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{L1E} &= \ell_k^2 \cdot \underline{Z}'_F \cdot \underline{k}_{S1} \cdot \underline{I}_{L1} \left(\underline{\gamma}_{11} + 1\right) \\ &= \ell_k \cdot \underline{Z}'_F \left(\underline{I}_{L1} - \underline{I}_{L1} \cdot \underline{k}_{S1} + \underline{k}_{S1} \cdot \underline{\gamma}_{12} \cdot \underline{I}_{L2} + \underline{k}_{S1} \cdot \underline{\gamma}_{13} \cdot \underline{I}_{L3}\right) \end{aligned} \tag{5}$$

Fehlerortung auf gemischten Kabel-Freileitungsstrecken:

Da bei Fehlern auf gemischten Kabel-Freileitungsstrecken zunächst der Fehlerort noch unbekannt ist, wird zunächst über Gleichung (1) der Fehlerort berechnet. Sollte der Fehlerort am Ende der Freileitung bzw. sogar hinter der Freileitung berechnet werden, kann zur Fehlerortung auf der Kabelstrecke Gleichung (5) angewendet werden. Hier allerdings mit einem korrigierten Spannungsfall $\underline{U}_{L1E}^{\text{Kabel}} = \underline{U}_{L1E}^{\text{Frltg.}} - \Delta \underline{U}_{L1}^{\text{Frltg.}}$. Mit dem Spannungsfall über dem Freileitungsanteil $\Delta \underline{U}_{L1}^{\text{Frltg.}} \approx \underline{Z}_1 \left(\underline{I}_{L1} - \underline{k}_E \underline{I}_E\right)$. Die Berechnungsmethode kann problemlos auch für Kabel mit crossgebondeten Kabelschirmen erweitert werden.



Sebastian Palm, Dipl.-Ing.

Frequenz- und Spannungsabhängigkeit der Leistungsaufnahme von Niederspannungs-Ortsnetzen

Projekt gefördert durch:
DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft

Im Laufe der letzten Jahre erfolgte eine starke Veränderung der Zusammensetzung elektrischer Lasten im Energieversorgungsnetz. Es ist ein stetig wachsender Anteil an Verbrauchern, die über leistungselektronische Stellglieder mit dem Netz verbunden sind, sowie die Abnahme des Anteils direkt gekoppelter rotierender Massen im Netz zu beobachten.

Um dieses geänderte Verhalten bewerten zu können wurde die Frequenz- und Spannungsabhängigkeit der Leistungsaufnahme in Ortsnetzen untersucht. Während geplanter Einsätze von Netzersatzanlagen (NEA) wurden gezielte Veränderungen von Amplitude und Frequenz der Versorgungsspannung durchgeführt, und Spannung und abgegebener Strom der NEA gemessen (siehe Bild I). Durch die Auswertung der Wirk- und Blindleistungsverläufe infolge der Veränderungen wurden Lastmodelle und Parameter abgeleitet, mit denen sich das Verhalten des Netzes beschreiben und rekonstruieren lässt.

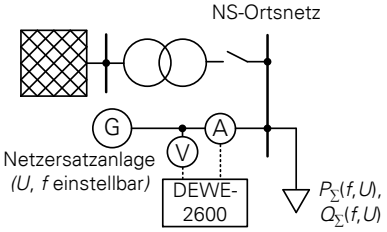


Bild I: Einphasige Darstellung des Messaufbaus

Für die Modellierung der Spannungs- und Frequenzabhängigkeit des Wirkleistungsbedarfs können bekannte Modelle, wie das Exponential- oder Polynomialmodell verwendet werden (siehe zum Beispiel [1-3]). In Gl. (1) wird für U eine exponentielle und für f eine lineare Abhängigkeit angenommen.

$$P\left(U,f\right)) = P_0 \cdot \left(\frac{U}{U_0}\right)^{k_{pu}} \cdot \left(1 + k_{pf} \cdot \left(\frac{f - f_0}{f_0}\right)\right) \tag{1}$$

Beim Blindleistungsbedarf kann auf diese Zusammenhänge nicht ohne Weiteres zurückgegriffen werden. Der Blindleistungsbedarf ist im Ortsnetz oft sehr gering ($Q_0 \approx 0$). Mit Q_0 als Referenzleistung wäre es damit nicht möglich realistische Parameter für die Lastmodelle abzuleiten. Deswegen wurde ein neuer Ansatz in

Gl. (2) gewählt, bei dem nicht die absolute Blindleistung, sondern nur die Änderung der Blindleistung bestimmt wird. Darüber hinaus wird dabei P_0 als Referenzwert genutzt. Dadurch können auch für sehr kleine Blindleistungen zweckmäßige Parameter ermittelt werden.

$$Q\left(U, f\right)) = Q_0 + \Delta Q = Q_0 + P_0 \cdot \left(k_{qu} \cdot \left(\frac{U - U_0}{U_0} \right) + k_{qf} \cdot \left(\frac{f - f_0}{f_0} \right) \right) \qquad (2)$$

In Bild II wurden die gemessenen Änderungen von P und Q bei einer Änderung von U und f dargestellt. Außerdem wurden das Lastmodell in Gl. (1) und die Blindleistungsänderung nach Gl. (2) mit den ermittelten Parametern eingetragen. Es zeigt sich ein exponentieller Zusammenhang zwischen U und P mit einem Exponenten $1 < k_{pu} < 2$, der Anteil leistungselektronischer Verbraucher ist demnach noch nicht dominierend. Es zeigt sich, dass im Ortsnetz nahezu kein Zusammenhang zwischen f und P besteht, da kaum rotierende Masse im System vorhanden ist. Die Blindleistung hingegen nimmt mit zunehmender Frequenz ab, die gemessenen Ortsnetze wiesen damit insgesamt eine induktive Charakteristik auf.

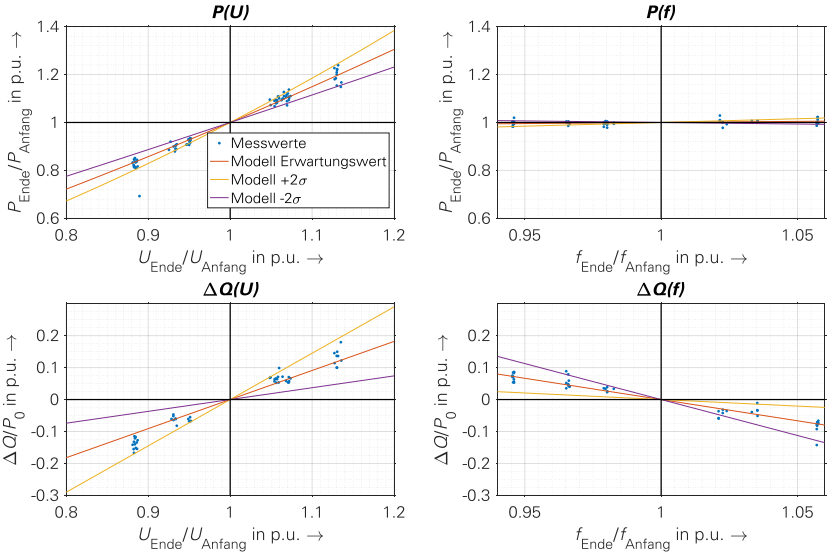


Bild II: Vergleich zwischen Messwerten eines Ortsnetzes und Modellierung mit den Parametern der ermittelten Verteilung

[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] S. Palm, P. Schegner *Static and transient load models taking account voltage and frequency dependence*. Power Systems Computation Conference, 2016.



Karsten Wenzlaff, M.Sc.

Untersuchung von Niederspannungsstörlichtbögen am Lichtbogenversuchsstand

Mit experimentellen Untersuchungen am Lichtbogenversuchsstand werden systembedingte Einflussfaktoren, wie beispielweise das *X*/*R*-Verhältnis der Anlage oder der Elektrodenabstand, auf Strom- und Spannungszeitverläufe von Störlichtbögen erforscht.

Lichtbogenversuchsstand

Der Lichtbogenversuchsstand ist fest aufgebaut und befindet sich auf dem Außengelände der TU Dresden. Die elektrischen Betriebsmittel sind mit einer witterungsbeständigen und feuerfesten Einhausung versehen. Bild I zeigt das einpolige Ersatzschaltbild des Versuchsstandes. Eine Außenansicht vom Versuchsstand wird auf Bild II gezeigt.

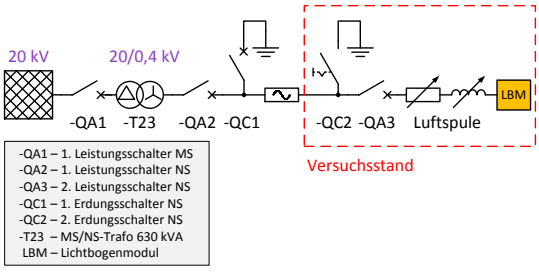


Bild I: Einpoliges Ersatzschaltbild



Bild II: Versuchsstand

An der Außenwand des Versuchsstands befindet sich das eigentliche Lichtbogenmodul, auf dem die Störlichtbögen gezündet werden. Am Lichtbogenmodul lassen sich die konstruktiven Einflussfaktoren:

- Elektrodenabstand
- Elektrodenanordnung
- Elektrodenmaterial

und die unterschiedlichen Fehlerarten variieren und deren Auswirkung untersuchen.

Durch den Einsatz von Luftspulen werden am Versuchsstand Betriebsmittelimpedanzen nachgebildet, wodurch sich die Auswirkungen der elektrischen Einflussfaktoren:

- *X/R*-Verhältnis
- Kurzschlussstromhöhe

auf die Strom- und Spannungsverläufe von Störlichtbögen untersuchen lässt. Im Bild III ist dazu der mögliche Einstellbereich für den prospektiven Kurzschlussstrom I''_{k1} des Versuchsstands in Abhängigkeit des *X/R*-Verhältnis für einen 1-poligen Fehler angegeben. Bei *X/R* = 4,25 kann ein maximaler Wert von I''_{k1} = 13,4 kA erreicht werden.

I''_{k1} lässt sich durch die Luftspule in Abhängigkeit vom *X/R*-Verhältnis variieren. Beim Vollabgriff der Luftspule ergibt sich *X/R* = 11, wodurch I''_{k1} = 1,825 kA resultiert. Am Lichtbogenversuchsstand können statt 1-poligen Störlichtbögen ebenfalls 2- und 3-polige Störlichtbögen mit und ohne Erdberührung untersucht werden.

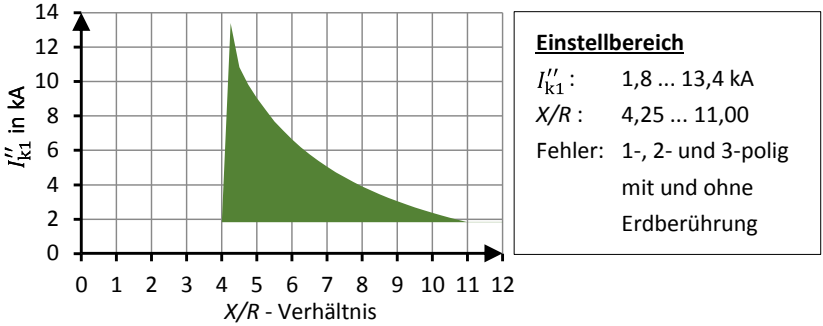


Bild III: Einstellbereich von I''_{k1} in Abhängigkeit des *X/R*-Verhältnis

Lichtbogenzündung

Zusätzlich zu den konstruktiven und elektrischen Einflussfaktoren lässt sich am Versuchsstand der Einfluss der Lichtbogenzündung untersuchen. Für die Zündung synthetisch erzeugter Störlichtbögen hat sich in der Niederspannung der Einsatz von einem Zünddraht, durch dessen Verdampfen der Lichtbogen zündet, als sehr effektiv erwiesen.

Ein wesentlichen Einfluss auf den resultierenden Strom- und Spannungsverlauf hat dabei der Querschnitt, das Material, die Länge und die Form (z. B. gewickelt oder gestreckt) des Zünddrahts. Zukünftig sollen ebenfalls unkonventionelle Zündmechanismen untersucht werden, die vergleichbar mit dem realen Fehlereintritt eines Störlichtbogens in einer Niederspannungsanlage sind.

Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Smart Grid“



Tobias Heß, Dipl.-Ing.

Systemkonzept für ein integrales Lastmanagement

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Die fortschreitende Energiewende stellt neue Herausforderungen an den Netzbetrieb und dem Ausgleich erzeugter und verbrauchter Energie. Zum einem übersteigt die installierte Leistung aus erneuerbaren Energieträgern die Spitzenlast in Deutschland. So wurde zum Beispiel am 23.08.2015 zwischen 12:15 und 14:15 die Last in Deutschland mit über 90 % durch EEG-Einspeiser gedeckt [1]. Zum anderen ist die verfügbare Netztransportkapazität begrenzt. Dies hat zur Folge, dass die EEG-Einspeisung durch das Einspeisemanagement nach §14 EEG und §13 EnWG begrenzt wird. So betrug im Jahr 2015 die Ausfallarbeit und somit nicht genutzte regenerative Energie 4,7 TWh [2]. Ein viel diskutierter Lösungsansatz ist hierbei das Lastmanagement. Für dieses eignen sich insbesondere elektrische Lasten mit hoher Leistung und integriertem Speicher. Beispielhaft sind hier Nachtspeicherheizungen, Elektrofahrzeuge und Wasserversorgungsanlagen zu nennen.

Erfolgt jedoch das Lastmanagement rein marktbasiert, so ergibt sich für die beteiligten Lasten in den Verteilnetzen eine sehr hohe Gleichzeitigkeit, da ein Lieferant bestrebt ist, die maximale Leistung bei niedrigem Strompreis zu beziehen. Dadurch können in den Verteilnetzen Engpässe auftreten. Um dies zu vermeiden ist ein integrales Lastmanagement erforderlich, dass die Betriebsgrenzen des Verteilnetzes beachtet.

Im Projekt *SERVING – Service-Plattform-Verteilnetze zum integralen Lastmanagement* wird ein solches integrales Lastmanagement entwickelt und in einen Pilot- sowie Feldversuch in der Praxis umgesetzt. Im ersten Schritt wurde hierfür das Systemkonzept nach der von CENELEC definierten Smart Grid Reference Architecture (SGAM) erarbeitet [3]. Das Konzept gliedert sich in Businesslayer, Funktionslayer, Informationslayer, Kommunikationslayer und Komponentenlayer.

Im Folgenden soll der Funktionslayer erläutert werden (siehe Bild I). Auf Basis des Businesslayer, welcher die Motive, Bedingungen und die Methodiken der Akteure in SERVING beschreibt, können die notwendigen Funktionen identifiziert werden.



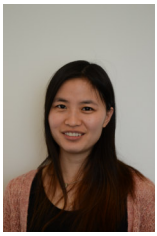
Bild I: Funktionslayer des Systemkonzeptes für SERVING

SERVING agiert dabei als Schnittstelle zwischen den Akteuren und realisiert folgende Funktionen:

1. Aus den aktuellen Netzdaten des Netzbetreibers wird eine Anlagescharf-Prognose aller nichtsteuerbaren Lasten und Erzeugungsanlagen erstellt.
2. Die vom Lieferanten übermittelte kumulierte Prognose des Energiebedarfs und die Flexibilität der Lasten wird durch SERVING anlagenscharf aufgelöst.
3. Mithilfe der Netzdaten, der Prognose und den Flexibilitäten können im nächsten Schritt die Einsatzgrenzen des Verteilnetzes berechnet werden. Diese werden an den Lieferanten übermittelt.
4. Der Lieferant beschafft an den Märkten die notwendige Energie für die flexiblen Lasten und erstellt einen Summenfahrplan. Dieser wird von SERVING durch die Fahrplan-Allokation auf die einzelnen Lasten aufgeteilt.
5. Während des Betriebs der flexiblen Lasten überwacht SERVING mit Hilfe einer State-Identifikation das Verteilnetz und übermittelt den Systemzustand an den Netzbetreiber.

Durch diese Architektur wird sichergestellt, dass zum einen die maximale Flexibilität der Lasten dem Lieferanten zur Verfügung steht und zum anderen keine Engpässe durch den Betrieb der Lasten im Verteilnetz auftreten.

[1] *Entsoe Transparency Platform*. unter: https://transparency.entsoe.eu (abgerufen am 17.10.2016)
[2] Bundesnetzagentur, *3. Quartalsbericht 2015 zu Netz- und Systemsicherheitsmaßnahmen*. Bonn 2016.
[3] CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group, *Smart Grid Reference Architecture*. 2012.



Ma Liya, Dipl.-Ing.

Hybrid-Heizsysteme in Regionalen Virtuellen Kraftwerken

Das Regionale Virtuelle Kraftwerk (RVK) verknüpft Mikro-Blockheizkraftwerke (μ-BHKW) in Ein- oder Mehrfamilienhäusern zu einer logischen Einheit. Beim Betrieb werden dabei die lokalen Randbedingungen in den Gebäuden, die Netzrestriktionen sowie die Vorgaben einer übergeordneten Zentrale berücksichtigt [1]. In diesem Beitrag wird die Erweiterung des Systems um Hybride-Heizsysteme dargestellt, welche sich in diesem Fall aus μ-BHKW, Direktheizungen (DH), Wäremespeicher und Spitzenlastkessel zusammensetzen. Für den Betrieb des RVKs ergeben sich somit weitere Freiheitsgrade.

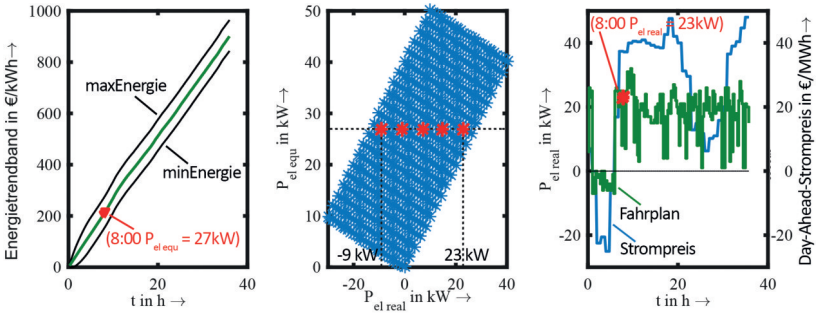
Das RVK-System wird in drei Ebenen aufgeteilt. Diese umfassen die Hausebene, die Netzebene und die Systemebene für die Vermarktung und Fahrplanerstellung [1]. Für die Fahrplanerstellung werden elektrische Energietrendbänder zwischen den Ebenen übertragen. Das Energietrendband eines Hauses setzt sich aus der minimal zu erzeugenden Energie zur Deckung des Wärmebedarfs und der maximal zu erzeugenden Energie zum Erlangen der maximalen Speicherkapazität zusammen. Für die Umrechnung von thermischer zu elektrischer Energie wird vereinfacht die Stromkennzahl σ genutzt. Durch das Addieren der Energietrendbänder aller Häuser werden in der Systemebene die Rahmenbedingungen der Stromerzeugung, innerhalb dessen die Vermarktungen stattfinden, bereitgestellt. Die Integration der DH bietet die Möglichkeit, mit einer negativen Energieerzeugung zu handeln und gleichzeitig Wärme im Gebäude zu erzeugen. Die Herausforderung dabei ist die Berechnung der elektrischen Energietrendbänder aus dem thermischen Bedarf. Durch die unterschiedlichen Stromkennzahlen und Wichtungen von μ-BHKW und DH ist die Beziehung zwischen elektrischer und thermischer Energie nicht mehr eindeutig. Um die Vorteile der bisherigen Methode beizubehalten, wird das μ-BHKW als Bezugssystem genutzt. Für eine bestimmte Leistungseinstellung des Heizsystems gibt es immer eine äquivalente Leistung $P_{\mathrm{el\,equ}}$, mit welcher die gleiche nutzbare thermische Leistung erzeugt wird. Die Energietrendbänder beschreiben die Rahmenbedingungen aus dem Wärmebedarf und Wärmespeicher. Diese ändern sich nicht und können somit weiter innerhalb des reinen μ-BHKW Heizsystems berechnet werden. Allerdings sind die darin behandelten Leistungen nicht die elektrische Leistung des BHKWs $P_{\mathrm{el\,BHKW}}$ sondern $P_{\mathrm{el\,equ}}$. $P_{\mathrm{el\,equ}}$ und die reale gesamte elektrische Leistung des Systems $P_{\mathrm{el\,real}}$ ergibt sich aus der Formel (1). Dadurch kann für jede Ebene die Einordnung zwischen $P_{\mathrm{el\,equ}}$ und $P_{\mathrm{el\,real}}$ bestimmt werden. Die $P_{\mathrm{el\,real}}$ ist die zu vermarktende Energie, wobei die Energiesummen aus $P_{\mathrm{el\,equ}}$ innerhalb der Energie-

trendbänder bleiben müssen. Unter dieser Bedingung kann der Fahrplan erstellt werden.

$$P_{\text{el equ}} = P_{\text{el BHKW}} + \frac{\sigma_{\text{BHKW}}}{\sigma_{\text{P2H}}} \cdot P_{\text{el P2H}} \qquad P_{\text{el real}} = P_{\text{el BHKW}} + P_{\text{el P2H}} \qquad (1)$$

Bild I zeigt ein Beispiel des RVK-Betriebs. Das RVK fährt planungsmäßig entlang der mittleren Energietrendlinie (grüne Linie im Bild Ia), bei welcher das gesamte Speichervolumen halb aufgeladen wird. Dieser Status sichert einerseits die nutzbare Wärmeenergie bei Abweichungen der Wärmebedarfsprognose, andererseits die Flexibilität beim weiteren Vermarktungsanreiz. Der Gradient der Linie bestimmt für jeden Zeitschritt eine $P_{\text{el equ}}$. Der rote Punkt zeigt eine $P_{\text{el equ}}$ von 27 kW gegen 8:00. Anhand der Einordnung der $P_{\text{el real}}$ und $P_{\text{el equ}}$ werden die möglichen $P_{\text{el real}}$ Werte von –9 bis 23 kW im Bild Ib sortiert. Aus diesen Werten kann nun für die Fahrplanerstellung bei Erhaltung der mittleren Energietrendlinie frei gewählt werden. Beispielweise kann ein erster Fahrplan im Day-Ahead-Markt erstellt werden (grüne Linie im Bild Ic). Bei positiven Strompreisen wird die am höchsten erzeugte Leistung, bei negativen Strompreisen wird die am niedrigsten erzeugte Leistung ausgewählt. Da der Strompreis um 8:00 positiv ist, wird der maximale $P_{\text{el real}}$ von 23 kW ausgewählt. Sollten sich die Preise im Intraday-Markt ändern, kann daraufhin der Fahrplan durch Flexibilität der Speicher bzw. Änderungen der Energietrendlinie angepasst werden.

Das Konzept mit Bezugssystem behält die Vorteile der Energietrendbänder bei. Zusätzlich ist es als zukunftsfähig gezeichnet, da eine Erweiterung des Systems mit anderen Wärme- oder elektrischen Anlagen, beispielsweise E-Mobilität, durch die Einordnung der $P_{\text{el real}}$ und $P_{\text{el equ}}$ möglich ist.



(a) Energietrendband (b) Einordnung (c) Fahrplan

Bild I: Fahrplanerstellung (+: Energieeinspeisung; –:Energiebezug)

[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.



Maximilian Schmidt, Dipl.-Ing.

Optimale Platzierung von Messtechnik zur Zustandsidentifikation im Verteilnetz

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Durch den hohen Zubau dezentraler Erzeugungsanlagen insbesondere in Nieder- und Mittelspannungsnetzen werden neue Anforderungen an die Netzbetriebsführung gestellt, kritische Netzzustände zu vermeiden. Da in diesen Netzen aktuell sehr wenig bis keine Messtechnik vorhanden ist, kann eine Netzzustandsidentifikation derzeit nicht durchgeführt werden. Zur Erkennung kritischer Netzzustände und für die Anwendung innovativer Smart Grid Konzepte ist die Kenntnis des Netzzustandes unumgänglich. Aufgrund der sehr hohen Knotenanzahl in Verteilnetzen ist eine vollständige messtechnische Erfassung wirtschaftlich nicht sinnvoll. Mit Hilfe effizienter Algorithmen kann eine Messkonfiguration ermittelt werden, die durch eine minimale Anzahl von Messgeräten bei Einhaltung der geforderten Schätzfehlergrenzen gekennzeichnet ist.

Zur Identifikation des Netzzustandes kommt das, aus dem Übertragungsnetz bekannte, *Weighted-Least-Squares* Verfahren zum Einsatz [1]. Bei diesem Verfahren wird die Summe der quadratischen Abweichungen von gemessenen und geschätzten Prozessgrößen minimiert. Eine wesentliche Voraussetzung für den Einsatz ist, dass die gegebene Messkonfiguration zu einem beobachtbaren System führt, d. h. jede Zustandsgröße wird mindestens einmal durch eine Messung erfasst. Zu diesem Zweck werden für Netzknoten, die nicht direkt gemessen werden, Pseudo-Messwerte verwendet. Pseudo-Messwerte stellen Annahmen zu gewissen Prozessgrößen dar, die beispielsweise aus anderen (gemessenen) Größen abgeleitet werden. Steht keine ausreichende Datenbasis zur Verfügung können statische Pseudo-Messwerte herangezogen werden. Ein leicht zu generierender Pseudo-Messwert für einen nicht gemessenen Knoten ist der 50 %-Wert der maximal zu erwartenden Last an diesem Knoten abzüglich der installierten Erzeugungsleistung.

Die Platzierung von Messtechnik stellt ein kombinatorisches Optimierungsproblem dar, welches aufgrund des sehr großen Lösungsraumes und der Nichtlinearität des Problems mit einem heuristischen Verfahren, dem Genetischen Algorithmus, gelöst wird. Ziel des Genetischen Algorithmus' ist es, dasjenige Individuum zu ermitteln, welches die Zielfunktion bestmöglich erfüllt. Da sowohl für Ströme auf Verbindungsleitungen als auch für Knotenspannungen Vorgaben zu maximal zulässigen Schätzfehlern existieren, fließen beide Größen in die Zielfunktion ein. Die ermittelten Schätzfehler hängen zudem von der betrachteten Lastflusssituation ab. Es werden im Rahmen der Optimierung daher mehrere Referenzlastflüsse berücksichtigt.

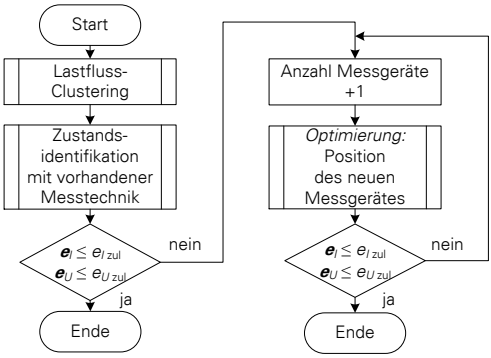


Bild I: Ablaufdiagramm des Platzierungsverfahrens

Einerseits gehen die Extrema; maximale Last und keine Erzeugung sowie keine Last und maximale Erzeugung ein, andererseits werden aus 100 Lastflüssen mit einer zufälligen Auslastung über einen Clusterung Algorithmus ausgewählte Referenzszenarien bestimmt. Durch den Optimierungsalgorithmus wird anschließend in konsekutiven Schritten die Anzahl von Messgeräten solange erhöht, bis eine Messkonfiguration bestimmt wurde, bei der alle Schätzfehlergrenzen in allen Szenarien eingehalten werden. Bild I zeigt den Ablauf der Methodik.

In Tabelle I sind die Ergebnisse der Optimierung für ein beispielhaftes Mittelspannungsnetz, bestehend aus 118 Netzknoten und 119 Leitungen, dargestellt. Der Mittelwert der maximal zu erwartenden Netzlasten beträgt $\overline{S}_{\max} = 195\,\text{kVA}$. Es ist zu erkennen, dass jedes zusätzliche Messgerät eine signifikante Verbesserung der gesamten Schätzfehlersituation bewirkt. Unter der Annahme eines zulässigen Fehlerniveaus von 10 % Stromschätzfehler bezogen auf den jeweiligen Bemessungsstrom der Verbindungsleitung und 1 % Spannungsschätzfehler bezogen auf die Netznennspannung lässt sich bereits mit sechs Messgeräten eine geeignete Messkonfiguration ermitteln.

Tabelle I: Ergebnisse der Optimierung für ein Mittelspannungsnetz

Anzahl Messgeräte	$e_{I\,\text{mittel}}$ / %	$e_{U\,\text{mittel}}$ / %	$e_{I\,\max}$ / %	$e_{U\,\max}$ / %
1	7,40	1,48	33,28	6,11
2	7,01	0,75	26,77	3,54
3	6,97	0,55	23,79	2,43
4	3,80	0,30	19,19	1,41
5	1,82	0,22	13,42	0,88
6	1,41	0,11	9,89	0,65

[1] Abur, A., Exposito A. G.: *Power System State Estimation*. Marcel Dekker, 2004.



Jens Werner, Dipl.-Ing.

Erprobung des Betriebskonzepts eines Regionalen Virtuellen Kraftwerks im Feldtest

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Im Jahr 2015 erreichten die erneuerbaren Energien (EE) einen Anteil am Bruttostromverbrauch von ca. 29 %. Dies zeigt, dass die Energiewende im Stromsektor bereits deutlich vorangeschritten ist. Um die energiepolitischen Ziele der Bundesregierung zu erreichen, ist es notwendig, auch die übrigen Sektoren mit EE zu erschließen. Beispielweise erreichten EE in der Wärme-/Kälteversorgung 2015 nur einen Anteil von ca. 13 %. Ein wesentlicher Baustein für die Umsetzung des Ziels ist die Kopplung der Sektoren Strom-Wärme-Gas [1].

Die praktische Realisierung und Demonstration der Sektorkopplung Strom-Wärme ist Ziel des aktuellen Forschungsprojektes „Praxiserprobung des Regionalen Virtuellen Kraftwerks auf Basis der Mikro-KWK-Technologie". In Kooperation mit der EWE AG werden in diesem Projekt 17 private Einfamilienhäuser mit einer Mikro-Kraft-Wärme-Kopplungsanlage (μKWK-Anlage), einem Heizstab und einem thermischen Pufferspeicher ausgestattet. Eine Therme dient der Spitzenlastdeckung. Zusätzlich werden die Anlagen sowie Gebäude umfangreich bzgl. elektr. und therm. Energieflüsse vermessen [2]. Die Messdaten werden durch das lokal installierte RVK * Gateway (RVK-GW) erfasst, verarbeitet und über den Standard IEC 60870-5-104 an die Leitwarte der EWE übermittelt. Die Anlagen sind somit kommunikationstechnisch vernetzt.

Mit der Heizperiode 2016/2017 erfolgt die Zusammenführung der Anlagen zu einem Regionalen Virtuellen Kraftwerk. Hierbei werden zwei verschiedene Betriebskonzepte für den koordinierten und stromoptimierten Betrieb der sonst wärmegeführten Anlagen untersucht. Bewertet werden die Konzepte bei unterschiedlichen Anwendungsfällen, wie z. B. der Direktvermarktung oder Regelleistungserbringung. Betriebskonzept 1 basiert auf einer Verbundregelung aller Anlagen durch das Backend und soll nicht weiter betrachtet werden.

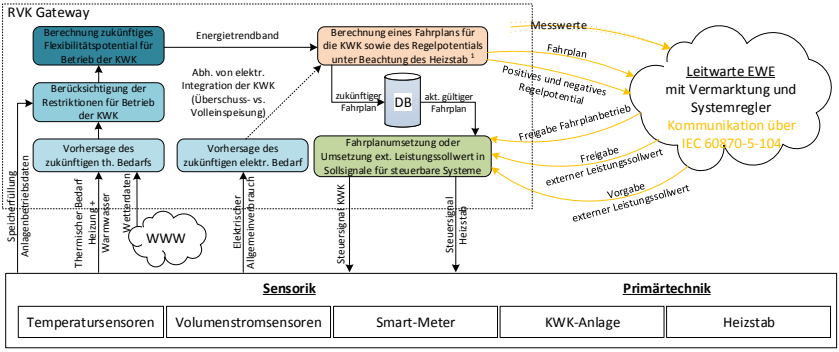
Betriebskonzept 2 ist schematisch in Bild I dargestellt. In diesem übernimmt das RVK-GW die Einsatzplanung der μKWK-Anlage. Hierzu wird in einem ersten Schritt auf Basis der Messdaten der zukünftige zu erwartende therm. sowie elektr. Bedarf bestimmt. Der therm. Bedarf wird genutzt, um das Flexibilitätspotential für den Betrieb der μKWK-Anlage zu bestimmen, welches auf idealer Weise durch das elektrische Energietrendband gemäß [3] beschrieben werden kann. Dabei sind aktuelle Messdaten wie z. B. die Speicherfüllung zu beachten. Anhand des Flexibilitätspotentials wird anschließend lokal ein optimierter Fahrplan für die μKWK generiert, welcher sowohl Gesichtspunkte der Energieeffizienz,

*Regionales Virtuelles Kraftwerk

Wirtschaftlichkeit als auch Anlagenrestriktionen berücksichtigt. Neben der μKWK existiert als steuerbare Anlage ein im Speicher integrierter Heizstab. Dieser wird nicht aktiv in die Einsatzplanung integriert, sondern dient zur Erhöhung des Regelpotentials, beschrieben durch einen positiven und negativen Grenzwert. Es gibt ausgehend vom Fahrplan die reduzierbare als auch zuschaltbare Erzeugerleistung an und berücksichtigt ebenso Anlagenrestriktionen. Die ermittelten Planungskriterien (Fahrplan und Regelpotential) werden an das Backend übermittelt und dort in die Vermarktungs- und Reglerstruktur integriert.

Parallel zu diesem Prozess muss der aktuell gültige, in der Datenbank gespeicherte Fahrplan unter Beachtung von Anlagenrestriktionen (Anlaufverhalten, minimale Laufzeit) umgesetzt werden. Hierzu ist es erforderlich, dass der übergeordnete Systemregler eine Freigabe erteilt. In diesem Fall generiert das RVK-GW aus dem vorgegebenen Fahrplan die zugehörigen Steuersignale für μKWK und Heizstab. Zusätzlich zum Fahrplanbetrieb besteht die Möglichkeit, dass der Systemregler einen Leistungswert für das System (μKWK + Heizstab) vorgibt, um z. B. Bilanzkreisabweichungen auszugleichen oder Regelleistung abzurufen. Bei erteilter Freigabe wird der Leistungswert umgesetzt.

Die Betriebskonzepte werden innerhalb des Projektes bzgl. u. a. Prognosegüte (Fahrplan, therm. Bedarf), Systemeffizienz, Regelleistungserbringung aber auch Erfüllung der lokalen Optimierungskriterien bewertet.



[1] Im Falle der elektrischen Einbindung der KWK in der Überschusseinspeisung ist es notwendig, den elektrischen Bedarf zu berücksichtigen. Für die Abrechnung der vermarkteten Energie ist der Hauszähler maßgebend. In diesem Fall muss somit ein Fahrplan des Gesamtsystems aus KWK sowie elektrischer Allgemeinverbrauch ermittelt werden.

Bild I: Betriebskonzept zur koordinierten Betriebsführung dezentraler μKWK

[1] Dr.-Ing. J. Seifert, J. Werner, T. Heß, *Kopplung von Elektroenergie- und Wärmemarkt am Beispiel dezentraler vernetzter Systeme*. GI - Gebäudetechnik in Wissenschaft und Praxis, Heft 01/2016, München 2016.

[2] L. Ma, *Feldtest eines regionalen virtuellen Kraftwerks auf Basis der Mikro-KWK-Technologie*. Jahresbericht 2015 - Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik, 2015

[3] T. Hess, J. Werner, P. Schegner, *Storage Potential of the Local Virtual Power Plant based on μCHP-Devices*. IEEE PES Transmission and Distribution 2014, 2014

3.1.2 Publikationen

Poster

Jäschke, C; Schegner P.:
Computing the Frequency Dependent Coupling Inductances in the Winding of High Current Instrument Transformers. IEEE MMM|Intermag 2016 Joint Conference,
San Diego, USA, 11.-15.01.2016

Jäschke, C; Schegner P.;
Mohns E.; Fricke S.: Measuring Harmonics using a Capacitive Current Clamp Sensor. FutureGrid/EIPow Workshop,
Braunschweig, 31.08.2016

Meyer, J.; Raabe, S.; Schegner, P.;Hauschild,J.: *Schutz und Betrieb von Phasenschiebertransformatoren*. 9. ETG-/FNN-Tutorial Schutz- und Leittechnik 2016,
Berlin, 23.-24.02.2016

Palm, S.; Meyer, J.; Schegner, P.:
Messung und Analyse des Kurzschlussstrombeitrages von Niederspannungs-PV-Wechselrichtern. 9. ETG-/FNN-Tutorial Schutz- und Leittechnik 2016,
Berlin, 23.-24.02.2016

Vorträge

Bauer, H.:
Isolationskoordination in Verteilungsnetzen. FGH-AKEI-Seminar Isolationskoordination - Überspannungen, Überspannungsschutz und Isolationsbemessung in Drehstromnetzen,
14. und 15.6.2016 in Deidesheim

Bauer, H.:
Untersuchung eines tödlichen Unfalls in der Badewanne. Tagung VDE-Ausschuss Sicherheits- und Unfallforschung
20.9.2016, BG ETEM, Linowsee

Bauer, H.; Irion, R.:
Untersuchung des tödlichen Unfalls im Schwimmbad. Tagung VDE-Ausschuss Sicherheits- und Unfallforschung
20.9.2016, BG ETEM, Linowsee

Bauer, H.:
Isolationskoordination und Überspannungsschutz. HdT-Seminar Hochspannungsschaltanlagen
9. und 10.11.2016 in Essen

Blanco, A. M.; Meyer, J.:
Aspects of Mitigation with Respect to New Equipment Technologies. Panel on Power Quality Issues in Smart Grids, 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP),
Belo Horizonte, Brasilien, 16.-19.10.2016

Collin, A. J.; Xu, X.; Djokic, S. Z.; Möller, F.; Meyer, J; Kutt, L.; Lehtonen, M.:
Survey of Harmonic Emission of Electrical Vehicle Chargers in the European Market. 2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM),
Anacapri, Italien, 22.-24.06.2016

Dickert, J.:
Der Zellulare Ansatz – Grundlage einer erfolgreichen, regionenübergreifenden Energiewende. VDE-Elektrotechnisches Kolloquium,
Dresden, 27.01.2016

Dickert, J.:
20. Fachgespräch „Neue Erzeugungs- und Netzstrukturen",
Leipzig, 28.04.2016

Dickert, J.:
Großes Netz oder Denken in Zellen. Kaminabend der Deutschen Umwelthilfe,
Berlin, 05.07.2016

Erdmann, N.:
The impact of 100 % renewables on the transmission system in Germany.
100 % Renewable Energy,
Flensburg, 04.-05.10.2016

Hess, T.:
Netzführung bis zum Endkunden Vorteile, Konzepte, Grenzen.
VDE-Symposium „Informationstechnik - Netzleittechnik",
Gotha, 06.-07.09.2016

Krahmer, S.:
Stabilitätsverhalten von Windenergieanlagen. VDE AK Verteilnetze,
Fürstenwalde, 07.-08.11.2016

Meyer, J.; Stiegler, R.; Hauptmann, H.:
Impact of electronic equipment on harmonic network impedance in residential networks. Panel on Aspects of modelling and measurement of harmonic network impedance, 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP),
Belo Horizonte, Brasilien, 16.-19.10.2016

Meyer, J.:
Design aspects for large PQ measurement campaigns. Panel on Challenges and Opportunities of Big Data in Power Quality Analysis, IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT) Europe,
Ljubljana, Slovenien, 09.-12.10.2016

Meyer, J.; Klatt, M.:
Sources, interferences, impact and case studies. Workshop on High Frequency Power Quality: Challenges for the future LV network,
Kortrijk, Belgien, Oktober 2016

Meyer, J. et al.:
Power Quality in zukünftigen Verteilungsnetzen - Neue Technologien, neue Herausforderungen. Tag der Fakultät,
Dresden, Oktober 2016

Meyer, J. et al.:
Tutorial on Harmonics in Distribution Networks with integration of Renewable Energy and Modern Electronic Equipment. IEEE PES Transmission & Distribution Latin America,
Morelia, Mexiko, 21.-24.09.2016

Meyer, J.; Klatt, M.:
Challenges in the frequency range 2-150 kHz (supraharmonics). 10th Electric Power Quality and Supply Reliability Conference,
Tallinn, Estland, 29.-31.08.2016

Meyer, J.; Stiegler, R.; Hauptmann, H.:
Harmonic impedance in residential low voltage networks in presence of electronic equipment. Panel on Modeling and measurement of network and equipment impedance for harmonic studies, (16PESGM2314), IEEE PES General Meeting,
Boston, USA, 17.-21.07.2016

Meyer, J. et al.:
Power Quality challenges in future distribution networks. 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE),
Prag, Tschechische Republik, 16.-18.05.2016

Meyer, J.; Rabe, S.; Wenzlaff, K.; Palm, S.; Schegner, P.; Hauschild, J.:
Schutz- und Betrieb von Phasenschiebertransformatoren. 9. ETG-/FNN-Tutorial Schutz- und Leittechnik 2016,
Berlin, 23.-24.02.2016

Palm, S.:
Demand Side Modelling Taking Account Voltage and Frequency Dependence. 17. IWHVE (International Workshop on High Voltage Engineering),
Dresden, 05.-08.09.2016

Palm, S.; Meyer, J.; Schegner, P.; Kerber, G.; Engel, M.:
Betrieb von Inselnetzen im Verteilnetz?. 9. ETG-/FNN-Tutorial Schutz- und Leittechnik 2016,
Berlin, 23.-24.02.2016

Schegner, P.; Dickert, J.:
Neues Rollenverständnis DSO 2.0 Zellularer Ansatz. DREWAG Meistertag,
Dresden, 11.05.2016

Schegner, P.; Dickert, J.:
Cellular Energy Networks – A New Concept Enabling Regional Balancing of Renewable Energies. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétrico,
Natal, Brasilien, 22.-25.05.2016

Schegner, P.; Dickert, J.:
Der zellulare Ansatz. Deutschen Umwelthilfe e.V. ,
Berlin, 05.06.2016

Schegner, P.:
Das elektrische Energiesystem der Zukunft: Zellular oder Zentral. 14. CIGRE/CIRED-Informationsveranstaltung,
Wiesbaden, 24.10.2016

Schegner, P.:
TU Dresden: University of Excellence. Schlesische Technische Universität Gliwice, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów,
Gliwice, Polen, 14.10.2016

Schegner, P.:
Comprehensive Research Projects for Future Energy Systems: Diversity is the Key. Transfer Week 2016,
TU Dresden, Dresden, 09.-11.11.2016

Schegner, P.:
Eine zellulare Energieversorgung – Vision oder Fiktion. Solarinitiative München Land (SIMLA),
Dresden, 17.11.2016

Schmidt, M.:
Optimale Platzierung von Messtechnik zur Zustandsidentifikation im Verteilnetz. Dresdner Kreis,
Dresden, 22.03.2016

Veröffentlichungen

Abdelrahman, S.; Liao, H.; Milanovic, J. V.; Gasch, E.; Domagk, M.; Meyer, J.:
Assessment of Power Quality Performance in Distribution Networks - Part 2 - Performance Indices and Ranking of Network Busses. 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP),
Belo Horizonte, Brasilien, 16.-19.10.2016

Ackermann,F.; Meyer, J.; Müller, S.; Santjer, F.; Athamna, I.; Klosse, R.:
Characterization of Harmonic Emission of Individual Wind Turbines and PV inverters based on measurements – Part I – Photovoltaic Inverters. Solar Integration Workshop,
Wien, Österreich, 14.-15.11.2016

Athamna, I.; Muehlberg, M.; Santjer, F.; Malekian, K.; Meyer, M. F.; Vennegeerts, H.; Meyer, J.; Domagk, M.; Ackermann, F.; Reichert, S.; Klosse, R.; Kuech, K.:
New Evaluation Methods for Harmonic Emission of Renewable Generation. Wind Integration Workshop,
Wien, Österreich, 15.-17.11.2016

Blanco, A. M.; Meyer, J.; Schegner, P.; Langella, R.; Testa, A.:
Survey of Harmonic Current Unbalance in Public Low Voltage Networks. 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP),
Belo Horizonte, Brasilien, 16.-19.10.2016

Blanco, A. M.; Stiegler, R.; Meyer, J.; Schwenke, M.:
Implementation of harmonic phase angle measurement for power quality instruments. IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems,
Aachen, 28.-30.09.2016

Bollen, M. H. J.; Das, R.; Djokic, S.; Ciufo, P.; Meyer, J.; Ronnberg, S. K.; Zavoda, F.:
Power Quality Concerns in Implementing Smart Distribution-Grid Applications. IEEE Transactions on Smart Grid,

Bosovic, A.; Renner, H.; Abart, A., Traxler, E.; Meyer, J.; Domagk, M.; Music, M.:
Validation of Aggregated Harmonic Current Source Models Based on Different Customer Type Configurations. 10th Electric Power Quality and Supply Reliability Conference,
Tallinn, Estland, 29.-31.08.2016

Cabadag, R.; Dickert, J.; Schmidt, U.; Schegner, P.:
Providing Reactive Power Requirements of Sub-Transmission Grids by Decentralized Wind Farms. RTUCON 2016,
Riga, Lettland, 13.-14.10.2016

Cabadag, R.; Schmidt, U.; Tiebel, R.; Schegner, P.:
Computer Based Analysis of Distributed Wind Farms for Reactive Power Management in Sub-Transmission Grids. NEIS 2016,
Hamburg, 15.-16.09.2016

Chakravorty, D.; Meyer, J.; Schegner, P.; Yanchenko, S.; Schocke, M.:
Impact of Modern Electronic Equipment on the Assessment of Network Harmonic Impedance. IEEE Transactions on Smart Grid,

Dickert J.; Seifert J.:
Modellierung elektrischer Lastprofile im Gebäudebereich. GI - Gebäudetechnik Wiss. Prax., vol. 137, no. 1, pp. 18–23,
2016

Gasch, E.; Domagk, M.; Meyer, J.; Abdelrahman, S.; Liao, H.; Milanovic, J. V.:
Assessment of Power Quality Performance in Distribution Networks - Part 1 - Measurement Campaign and Initial Analysis. 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP),
Belo Horizonte, Brasilien, 16.-19.10.2016

Hess, T.; Dickert, J.; Schegner, P.:
Multivariate Power Flow Analyses for Smart Grid Applications Utilizing Mosaik. IEEE PES Innovaticve Smart Grid Technologies (ISGT) Europe,
Ljubljana, Slovenien, 09.-12.10.2016

Jäschke, C; Schegner P.:
Berechnung der Resonanzeffekte bei Hochstromwandlern.
Kraftwerkstechnisches Kolloquium,
Dresden, 18.-19.10.2016

Konzelmann, S.; Martin, F.; Stiegler, R.; Meyer, J.:
Oberschwingungsmessungen im Übertragungsnetz – Anforderungen, geeignete Messsysteme, Analysemöglichkeiten. ew - Magazin für die Energiewirtschaft, Heft 6/2016, S.70

Kreutziger, M.; Becker, W.; Schegner, P.; Habermann, E.:
Anwendungsfall-optimierte Bereitstellung von Blindleistung aus dezentralen Erzeugungsanlagen im 110-kV-Verteilnetz. EnInnov 2016 - 14. Symposium Energieinnovation,
Graz, Österreich, 10.-12.02.2016

Langella, R.; Testa,A.; Djokic, S. Z.; Meyer, J.; Klatt, M.:
On the Interharmonic Emission of PV Inverters Under Different Operating Conditions. 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP),
Belo Horizonte, Brasilien, 16.-19.10.2016

Langella, R.; Testa, A.; Meyer, J.; Möller, F.; Stiegler, R.; Djokic, S. Z.:
Experimental-Based Evaluation of PV Inverter Harmonic and Interharmonic Distortion Due to Different Operating Conditions. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,
Mai 2016

M. Klatt; Meyer, J.; Schegner, P.; Lakenbrink, C.:
Characterization of supraharmonic emission caused by small photovoltaic inverters. Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower),
Belgrad, Serbien, 06.-09.11.2016

Malano, A.; Müller, S.; Meyer, J.; Bachmann, S.:
Harmonic Interaction of Electric Vehicle Chargers in a Central Charging Infrastructure. 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP),
Belo Horizonte, Brasilien, 16.-19.10.2016

Meyer, J.; Blanco, A. M.; Domagk, M.; Schegner, P.:
Assessment of Prevailing Harmonic Current Emission in Public Low Voltage Networks. IEEE Transaction on Power Delivery (TPWRD),

Meyer, J.; Domagk, M.; Kirchner, L.; Malekian, K.; Safargholi, F.; Hoven, M.; Athamna, I.; Muehlberg, M.; Scheben, F.; Ackermann, F.; Klosse, R.; Kuech, K.:
Survey on International Practice of Calculating Harmonic Current Emission Limits. 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP),
Belo Horizonte, Brasilien, 16.-19.10.2016

Meyer, J.; Klatt, M.:
Supraharmonische: Modeerscheinung oder ernstzunehmende Netzrückwirkung?. netzpraxis - Magazin für Energieversorgung, Heft 7-8/2016, S. 18

Meyer, J.; Mueller, S.; Ungethuem, S.; Xiao, X.; Collin, A.; Djokic, S.:
Harmonic and Supraharmonic Emission of On-Board Electric Vehicle Chargers. IEEE PES Transmission & Distribution Latin America, Morelia, Mexiko, 21.-24.09.2016

Meyer, J.; Müller, S.; Schegner, P.; Djokic, S. Z.; Collin, A. J.; Xu, X.:
Comparison of Methods for Modelling Electric Vehicle Chargers for Harmonic Studies. 19th Power Systems Computation Conference (PSCC), Genua, Italien, 20.-24.06.2016

Meyer, J.; Müller, S.; Ungethuem, S.:
Network disturbances caused by Electric Vehicle Chargers. National Electric Vehicle Symposium,
Morelia, Mexiko, April 2016

Meyer, J.; Stiegler, R.; Schegner, P.; Kilter, J.:
Accuracy of Voltage Instrument Transformers for Harmonic Measurements in Elering's 330-kV-Transmission Network. 10th Electric Power Quality and Supply Reliability Conference,
Tallinn, Estland, 29.-31.08.2016

Möller, F.; Meyer, J.:
Probabilistic Household Load Model for Unbalance Studies Based on Measurements. 10th Electric Power Quality and Supply Reliability Conference,
Tallinn, Estland, 29.-31.08.2016

Möller, F.; Meyer, J.; Raduaer, M.:
Impact of a High Penetration of Electric Vehicles and Photovoltaic Inverters on Power Quality in an Urban Residential Grid Part I – Unbalance. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'16),
Madrid, Spanien, 04.-06.05.2016

Müller, S.; Meyer, J.; Möller, F.; Naumann, M.; Radauer, M.:
Impact of a High Penetration of Electric Vehicles and Photovoltaic Inverters on Power Quality in an Urban Residential Grid Part II – Harmonic Distortion. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'16),
Madrid, Spanien, 04.-06.05.2016

Palm, S.; Meyer, J.; Kerber, G.:
Betrieb von Inselnetzen im Verteilnetz?. netzpraxis - Magazin für Energieversorgung,
Dietzenbach, Februar 2016

Palm, S.; Schegner, P.:
Static and Transient Load Models Taking Account Voltage and Frequency Dependence. 19th Power Systems Computation Conference (PSCC),
Genua, Italien, 20.-24.06.2016

Peterson, B.; Rens, J.; Meyer, J.; Botha, G.; Desmet, J.:
On The Assessment of Harmonic Emission in Distribution Networks: Opportunity for the Prevailing Harmonic Phase Angle. 2016 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS 2016),
Aachen, 28.-30.09.2016

Santjer,F.; Nolopp, K.; Adloff, S.; Athamna, I.; Muehlberg, M.; Meyer, M.-F.; Jordan, M.; Klosse, R.; Kuech, K.; Ackermann, F.; Meyer, J.; Domagk, M.; Pourarab, M.:
Characterization of Harmonic Emission of Individual Wind Turbines and PV inverters based on measurements – Part II – Wind Turbines. Wind Integration Workshop,
Wien, Österreich, 15.-17.11.2016

Schmidt, M.; Hess, T.; Schegner, P.:
Studies on Provision of Ancillary Services by Distributed Generation Units and Storage Devices. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT) Europe,
Ljubljana, Slovenien, 09.-12.10.2016

Schwanz, D.; Möller, F.; Rönnberg, S. H.; Meyer, J.; Bollen, M. H. J.:
Stochastic Assessment of Voltage Unbalance due to Single-Phase-Connected Solar Power. IEEE Transaction on Power Delivery (TPWRD), 2016, Issue: 99

Seifert, J. ; Hess, T.; Werner, J.:
Kopplung von Elektroenergie- und Wärmemarkt am Beispiel dezentraler vernetzter Systeme. GI - Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis, Bd. 137 (2016), Nr. 1, S. 4–15

Stetz, T.; Wende- von Berg, S.; Kreutziger, M.; et al.:
Beiträge von Flächenverteilnetzen zur Erbringung von Systemdienstleistungen - Technische Anwendungsszenarien. 3. OTTI-Konferenz - Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien,
Berlin, 26.-27.01.2016

Stiegler, R.; Meyer, J.; Kilter, J.; Konzelmann, S. :
Assessment of Voltage Instrument Transformers Accuracy for Harmonic Measurements in Transmission Systems. 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP),
Belo Horizonte, Brasilien, 16.-19.10.2016

Xu, X.; Collin, A. J.; Djokic, S. Z.; Langella, R.; Testa, A.; Meyer, J.; Möller, F.:
Harmonic Emission of PV Inverters Under Different Voltage Supply Conditions and Operating Powers. 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP),
Belo Horizonte, Brasilien, 16.-19.10.2016

Xu, X.; Collin, A. J.; Djokic, S. Z.; Müller, S.; Meyer, J.; Langella, R.; Testa, A.:
Evaluation of Hybrid Harmonic Interactions of EVs and CFLs. IEEE PES Innovaticve Smart Grid Technologies (ISGT) Europe,
Ljubljana, Slovenien, 09.-12.10.2016

Xu, X.; Collin, A. J.; Djokic, S. Z.; Yanchenko, S.; Möller, F.; Meyer, J.; Langella, R.; Testa, A.:
Analysis and Modelling of Power-Dependent Harmonic Characteristics of Modern PE Devic-es in LV Networks. IEEE Transaction on Power Delivery (TPWRD), 2016, Issue: 99

Xu, X.; Collin, A. J.; Djokic, S. Z.; Langella, R.; Testa, A.; Meyer, J.; Möller, F.; Yanchenko, S.:
On the Impact of Operating Modes and Power Supply Conditions on the Efficiency of Power Electronic Devices. 2016 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS 2016),
Aachen, 28.-30.09.2016

Zavoda, F.; Bollen, M.H.J.; Ronnberg, S.K.; Ciufo, P.; Langella, R.; Lazaroiu, G.C.; Meyer, J.:
Power Quality and EMC Issues associated with future electricity networks – status report on behalf of CIGRE/CIRED JWG C4.24. CIGRE Session 2016,
Paris, Frankreich, August 2016

Zyabkina, O.; Domagk, M.; Meyer, J.; Schegner,P.:
Classification and Identification of Anomalies in Time Series of Power Quality Measurements. IEEE PES Innovaticve Smart Grid Technologies (ISGT) Europe,
Ljubljana, Slovenien, 09.-12.10.2016

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:

- Bestimmen der Lebensdauer und der Grenztemperatur stromführender Verbindungen mit beschichteten und unbeschichteten Kontaktpartnern
- Untersuchungen zu den physikalischen Mechanismen der Alterung (Kraftabbau, Interdiffusion, chemische Reaktionen, Reibverschleiß und Elektromigration)
- Modellieren und Berechnen der Alterung stromführender Verbindungen
- Weiterentwickeln von Prüfungen zur elektrischer Alterung von stromführenden Verbindungen für die Anwendung in Normen
- Betriebs- und Langzeitverhalten von Steckverbindungen mit Federelementen für Hochstromanwendungen
- Untersuchen von Armaturen für Hochtemperatur-Freileitungsseile
- Langzeitverhalten und Grenztemperaturen von Ganzbereichssicherungen bei erhöhter Umgebungstemperatur
- Elektrische Eigenschaftsprofile umformtechnischer Fügeverbindungen (z. B. Pressen, Clinchen, Stanznieten)

Hochspannungstechnik

Isolierungen für Hochspannungs-Gleichstromübertragungen:

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

Hochspannungsmaschinenisolierungen:

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

Untersuchungen zu Elektroimpulsverfahren zur Gesteinszerstörung

Untersuchen der Stromverteilung und Erwärmung elektrischer Betriebsmittel

Untersuchen der Stromverteilung und Erwärmung elektrischer Betriebsmittel:

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

Der Einsatz von Hochtemperatursupraleiter (HTSL) der zweiten Generation, in Form von REBCO-Bandleitern, in Betriebsmitteln der Elektroenergietechnik, wie z. B. supraleitenden Strombegrenzern, erfordert die Qualifizierung elektrischer Verbindungen bei tiefen Temperaturen. Die Arbeitstemperatur dieser Betriebsmittel und der darin eingesetzten stromtragenden Verbindungen liegt beim Siedepunkt von flüssigem Stickstoff (LN_2 , ϑ_S = –195,8 °C). Der Aufbau eines induktiven supraleitenden Strombegrenzers (iSFCL) basiert auf dem Transformator-Prinzip. Die normalleitende Primärspule sowie die supraleitende Sekundärspule sind konzentrisch um einen Eisenkern angeordnet. Zusätzlich ist die supraleitende Spule mit einem normalleitenden Bypass geschützt (Bild I).

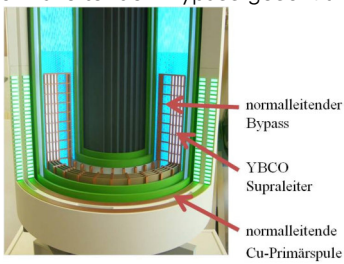


Bild I: Aufbau eines induktiven supraleitenden Strombegrenzers (iSFCL)

Dieser Aufbau macht elektrische Verbindungen zwischen Supraleitern und/oder Normalleitern notwendig.

Da die Europäischen Union derzeit an verschiedenen Richtlinien wie z. B. RoHS (RoHS = Restriction of Hazardous Substances) [1] arbeitet, um Kadmium sowie Blei aus industriellen Anwendungen zu streichen, beschäftigt sich diese Arbeit mit alternativen Fügemethoden zum Weichlöten. Es wurden daher Verbindungen mit den Fügetechnologien Klemmen, Kleben und RMS-Löten (RMS = reactive nanometer 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. Die Verbindungen zwischen Normal- und Supraleiter wurden entsprechend dem Einsatz im iSFCL parallel verschaltet und untersucht (Bild II) [2]. Der Supraleiter

wurde hierbei über eine Klemmverbindung in den Hauptstrompfad eingebracht. Der Bypass ist mit einem normalleitenden Kupferbandleiter mit identischen Abmessungen wie der Supraleiter ausgeführt.

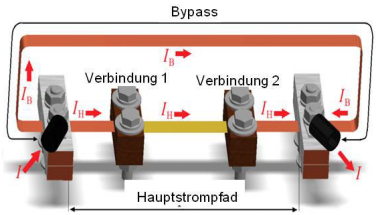


Bild II: Schematische Darstellung des Prüfaufbaus der Parallelschaltung

Wird der Strom I eingespeist, teilt sich dieser entsprechend dem Widerstandsverhältnis in den Strom des Hauptstrompfades I_H sowie den Bypass Strom I_B auf. Somit kann im Fehlerfall das Kommutierungsverhalten (Bild III) des Supraleiters auf den Bypass untersucht werden.

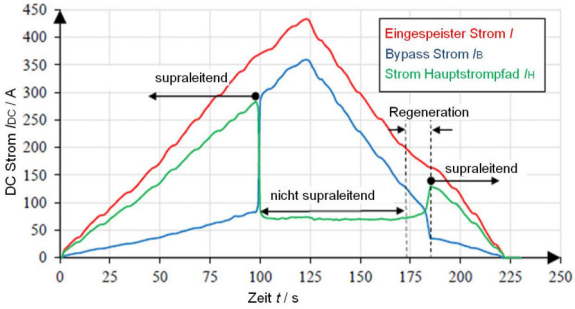


Bild III: Kommutierungsverhalten einer geklemmten Verbindung mit Supra- und Normalleiter

Zunächst fließt der Strom I im Supraleiter (grüne Kurve). Wird der kritische Strom I_c des Supraleiters erreicht, quencht dieser und der Strom I_H kommutiert entsprechend dem Widerstandsverhältnis auf den Bypass (blaue Kurve). Wird der eingespeiste Strom I weiter erhöht, steigt lediglich der Strom im Bypass I_B an. Der Supraleiter wird vor unzulässig hohen Fehlerströmen geschützt. Reduziert sich der Strom I wieder, regeneriert sich der Supraleiter automatisch und übernimmt erneut den Strom I_H. Es zeigt sich, dass ein Fehlerstrom nach diesem Wirkprinzip nicht mehr vollständig unterbrochen werden muss.

[1] ZVEI. [Online] http://www.zvei.org/Themen/GesellschaftlundUmwelt/Seiten/RoHS-Richtlinie.aspx, Abruf: 08.02.2016
[2] K. Bäuml, S. Großmann, Investigations on different joining techniques regarding electrical joints with normal conducting material and YBCO coated conductors, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol 26, Issue 3, April 2016



Torsten Fuhrmann, Dipl.-Ing.

Neuentwickelte, kriechfestere Aluminiumlegierungen für stromführende Verbindungen in der Elektroenergietechnik

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

Für den Einsatz von Leitern aus Aluminium bei Temperaturen über 100 °C für langzeitstabile, stromführende Verbindungen ist insbesondere die Kriechfestigkeit des Materials entscheidend. Härtende Phasen in der Aluminiummatrix sollen die Zeitstandfestigkeit erhöhen, ohne die Leitfähigkeit stark zu verringern. Als Referenz zur Bewertung dienen das technisch reine Aluminium (Al99,7) und die häufig in der Elektrotechnik eingesetzte und genormte Al-Mg-Si-Legierung (EN AW-6101)*. Die Materialien werden als Stromschienen in Langzeitversuchen mit Schraubenverbindungen untersucht und der Abbau der Verbindungskraft F_V verglichen (Bild I). Wird ein Mindestwert der Verbindungskraft unterschritten erhöht sich der Verbindungswiderstand unkontrollierbar und die Verbindung kann ausfallen.

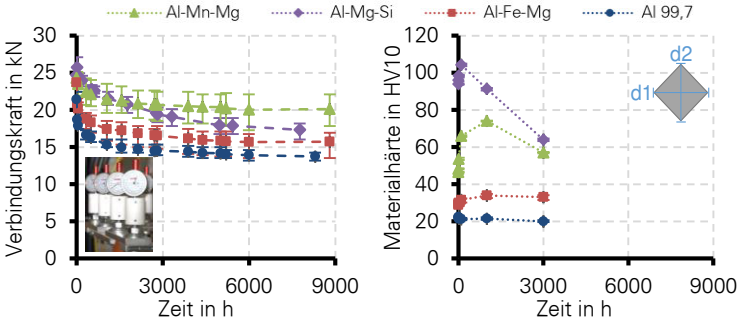


Bild I: Verbindungskraft F_V und Materialhärte abhängig von der Legierung und Betriebszeit bei 140 °C (Al99,7 bei 90 °C)

In Langzeitversuchen an je zehn stromführenden Verbindungen wurde die Verbindungskraft bei einer konstanten Temperatur von 140 °C und zyklisch der Verbindungswiderstand R_V im ausgeschalteten Zustand bei Raumtemperatur gemessen (Bild II). Die Verbindungen mit Al99,7-Stromschienen wurden aufgrund von experimentellen Erfahrungswerten bei einer geringeren Temperatur von 90 °C untersucht [1]. Die elektrische Leitfähigkeit und die Härte der gealterten Werkstoffe wurden zusätzlich ermittelt, um Veränderungen im Materialgefüge erkennen zu können [2]. Beide Referenzlegierungen haben eine ausgeprägte Hysterese beim

*DIN 40501-2:2005-03 und DIN EN 573-3:2013-03

R_V-F_V-Verhalten, wodurch sich trotz starkem und teils andauerndem Kraftabbau der Verbindungswiderstand nicht erhöhte (Bild I, II).

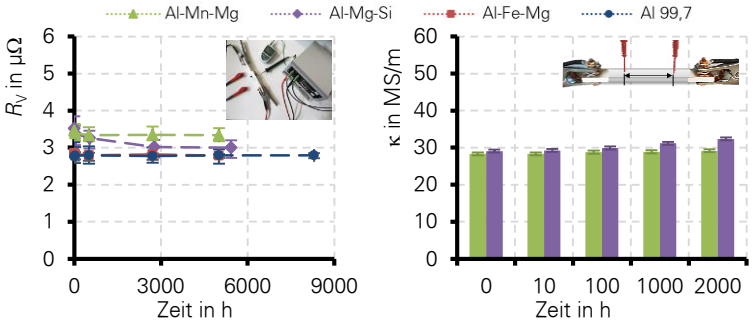


Bild II: Verbindungswiderstand R_V und elektrische Leitfähigkeit κ abhängig von der Legierung und Betriebszeit bei 140 °C (Al99,7 bei 90 °C)

Im Vergleich dazu verringerte sich die mittlere Verbindungskraft der Al-Fe-Mg- und Al-Mn-Mg-Legierungen auf einen konstanten Wert (Bild I). Bisher zeigte sich, dass Verbindungen mit Stromschienen aus Al-Mn-Mg-Legierung den geringsten Kraftabbau haben. Dabei sind geringe Veränderungen der elektrischen Leitfähigkeit und der Materialhärte, die auf Veränderungen im Materialgefüge hindeuten, zu erkennen. Bei der aushärtbaren Al-Mg-Si-Legierung sind derartige Veränderungen auf ein Überaltern des Materials durch das Wachstum von Ausscheidungen zu erklären. Während sich die Materialhärte verringert, erhöht sich dabei die elektrische Leitfähigkeit. Die Langzeitstabilität der Verbindungen im Dauerbetrieb über mehrere Jahrzehnte bei 140 °C und insbesondere bei Kurzzeitströmen im Fehlerfall ist aufgrund der anhaltenden Materialentfestigung nicht gewährleistet. Weitere geeignete Legierungselemente sind Fe, Zr und Ni. Diese wurden in verschiedenen Konzentrationen in Reinaluminium aber auch als zusätzliche Elemente in die Al-Mg-Si-Legierung eingebracht und werden nun ebenfalls in Langzeitversuchen erprobt. Zusätzlich zur Dispersionshärtung wurde an ausgewählten Legierungen eine Kaltverfestigung durch Walzen der Stromschienen angeschlossen. Die erwarteten Gefügeveränderungen werden durch metallographische Untersuchungen erforscht und die Ergebnisse aus den Langzeitversuchen zur Bewertung der Langzeitstabilität der Verbindungen, sowie zum Verifizieren eines Kraftabbau-Berechnungsmodells verwendet.

[1] Fuhrmann, T., et al.: *Langzeitverhalten von optimierten Verbindungssystemen mit Leitern aus Al und Al-Legierungen bei Temperaturen über* 90 °C. 22. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe 2013

[2] Kemsies, R. H., et al.: *Effect of Dispersoids on long-term stable electrical connections.* 15th International Conference on Aluminum Alloys, Chongqing 2016



Michael Gatzsche, Dr.-Ing.

Wirtschaftlich optimale Auswahl von Betriebsmitteln am Beispiel von Schienenverteilersystemen

Beim Einsatz elektrotechnischer Betriebsmittel in das Stromnetz müssen technische Mindestanforderungen erfüllt werden. So sollten beispielsweise Niederspannungs-Schienenverteiler (Bild I), für eine platzsparende Verbindung des Transformators mit der Schaltanlage, einen Bemessungsstrom I_r aufweisen, der größer als der maximale Dauerbetriebsstrom $I_{b\,max}$ ist.

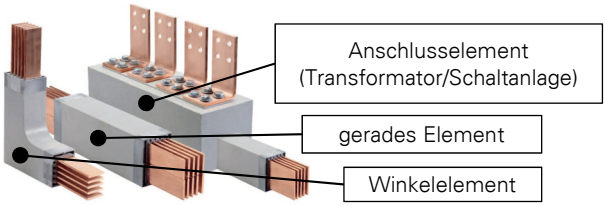


Bild I: verschiedene Elemente eines Niederspannungs-Schienenverteilers [1]

Erfüllen mehrere Produkte die technischen Mindestanforderungen, sind die Investitionskosten bei der Betriebsmittelauswahl oftmals das Entscheidungskriterium. Zusätzlich sollte beachtet werden, dass beim Stromtransport stets Stromwärmeverluste P_V entstehen. Da der Betreiber die mit der Zeit anfallende Verlustenergie $E_V = \int P_V \, dt$ bezahlen muss, entstehen selbst bei wartungsfreien Betriebsmitteln, wie Schienenverteilern, Betriebskosten.

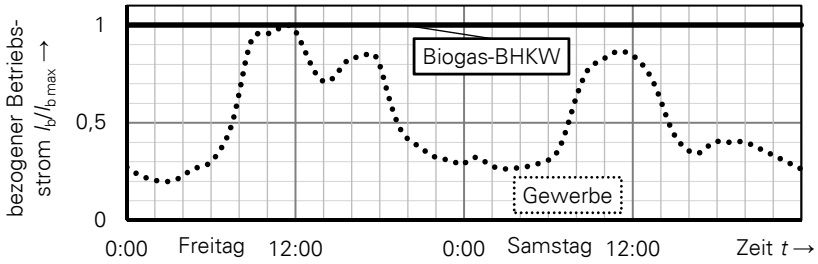


Bild II: Verlauf der Strombelastung an zwei Tagen im Winter für einen allgemeinen Gewerbekunden [2] und ein Biogas-Blockheizkraftwerk

Am Beispiel eines 50 m langen Schienenverteilersystems, das einen maximalen Betriebsstrom von $I_{b\,max} = 910$ A (630-kVA-Transformator) zu führen hat, wurden mit der Kapitalwertmethode die Gesamtkosten (Investitions- und Betriebs-

kosten) für eine Betriebsdauer von zehn Jahren für zwei sehr unterschiedliche Lastprofile „Gewerbe“ und „Biogas-BHKW“ (Bild II) berechnet. Dabei wurden die Gesamtkosten des Schienenverteilers SV1 (I_r = 930 A) mit denen des Schienenverteilers SV2 (I_r = 1510 A) aus der gleichen Baureihe aber mit doppeltem Leiterquerschnitt verglichen. Aufgrund des größeren Bemessungsstroms ist SV2 aus technischer Sicht für die Anforderung $I_{b\,max}$ = 910 A deutlich überdimensioniert. Der größere Leiterquerschnitt führt zudem gegenüber SV1 zu 57 % höheren Investitionskosten (Bild III). Allerdings werden der ohmsche Widerstand und damit bei gleichem I_b die Stromwärmeverluste und damit auch die Betriebskosten näherungsweise halbiert. Beim Lastprofil „Gewerbe“, mit sich im Tages- und Wochenverlauf stark verändernder Strombelastung und nur kurzen Belastungszeiten mit $I_{b\,max}$ (Bild II), sind die Investitionskosten dominant und SV1 ist über zehn Betriebsjahre günstiger (Bild III). Biogas-BHKWs werden dagegen dauerhaft sehr hoch ausgelastet, um möglichst viel Energie ins Netz einspeisen zu können (Bild II). In dem Fall sind die durch die Stromwärmeverluste verursachten Betriebskosten dominant und SV2 ist bereits ab einer Betriebsdauer von vier Jahren günstiger (Bild III). Auch aus ökologischer Sicht ist es sinnvoll, SV2 einzusetzen, da der Wirkungsgrad η der Energieübertragung ca. 1 % höher liegt und in zehn Jahren insgesamt 430 000 kW h Energie eingespart werden. Bei hoher Auslastung der Betriebsmittel ist es wirtschaftlicher und ökologischer größere Leiterquerschnitte einzusetzen.

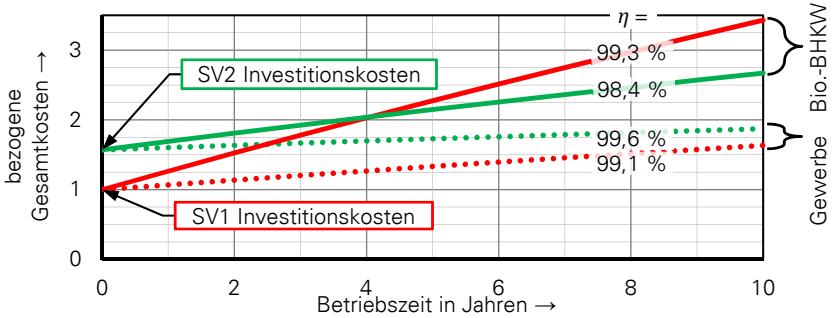
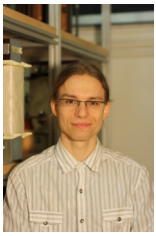


Bild III: Verlauf der Gesamtkosten der Schienenverteiler SV1 und SV2 für zwei Lastprofile (Einsatzort: Schweiz, Strompreis: 12,02 Rp/kWh [3], Kalkulationszinssatz = 3 %, Teuerungsrate = 1 % [4])

[1] LANZ Oensingen AG: Niederspannungs-Schienenverteiler LANZ HE, Vers. 2.5.2, 2013
[2] Energienetze Bayern GmbH: Standardlastprofile (SLP). [Online] www.energienetze-bayern.com/cps/rde/xchg/energienetze-bayern/hs.xsl/852.htm, Abruf 25.10.2016
[3] Eidgenössische Elektrizitätskommission: Strompreise Kanton Zürich 2016, Kategorie C6. [Online] https://www.strompreis.elcom.admin.ch/Map/ShowSwissMap.aspx, Abruf 25.10.2016
[4] Bundesamt für Verkehr: Vorgabewerte für Teuerung und Kalkulationszinssatz. [Online] www.bav.admin.ch/bav/de/home/themen/alphabetische-themenliste/formulare/infrastrukturfinanzierung, Abruf 25.10.2016



Christian Hildmann, Dipl.-Ing.

Einfluss der Verbindungslänge von Pressverbindungen mit Leiterseilen auf ihre elektrische Charakteristik

Stromführende Verbindungen in der Elektroenergietechnik sind ausnahmslos sicherheits- und zuverlässigkeitsrelevante Betriebsmittel. Die Verbindungen, die die Leiterseile von Freileitungen mit Armaturen stromführend verbinden, werden Jahrzehnte mit stetig wechselnden elektrisch-thermischen, mechanischen und Umweltbelastungen betrieben. Die Verbindungen werden diesen Belastungen am besten gerecht, wenn die Konstruktion der Armaturen elektrisch und mechanisch optimiert wird. Betrachtet werden im Folgenden die elektrischen Eigenschaften von Pressverbindungen mit Leiterseilen. Die im Hinblick auf das elektrische Kontaktverhalten optimalen radialen Abmessungen einer Armatur für die Pressverbindung mit einem mehrdrähtigen Verbund-Leiterseil wurden bereits experimentell ermittelt [1]. Die optimale Länge einer Pressverbindung kann mit einem vereinfachten elektrischen Modell bestimmt werden (Bild I). Mit diesem Modell wurden die Ersatz-Materialwiderstände des Leiterseils und der Armatur sowie ein Ersatz-Querwiderstand bestimmt. Der Verbindungswiderstand ist die Summe der drei Ersatz-Widerstände. Diese Ersatz-Widerstände wurden aus den Verlustleistungen eines elektrischen Modells mit verteilten Widerständen berechnet [2].

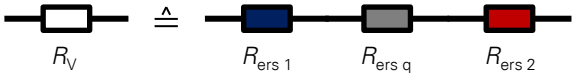


Bild I: Vereinfachtes Ersatzschaltbild einer Pressverbindung

Es wurde beispielhaft eine neuwertige Pressverbindung aus Armatur und Leiterseil mit gegebenen längenbezogenen Materialwiderständen R'_1 und R'_2 sowie dem spezifischen Querwiderstand R'_q betrachtet. Mit diesen Parametern wurden der Verbindungswiderstand und seine Anteile abhängig von der Verbindungslänge berechnet (Bild II). Ist die Verbindung nur einige wenige Zentimeter lang sind, verringert sich der Verbindungswiderstand bis bei s_{min} ein lokales Minimum erreicht wird. In diesem Bereich dominiert der Kontaktwiderstand, der sich durch das Parallelschalten zusätzlicher Mikrokontakte signifikant verringert. Hat die Verbindung eine Länge, die größer als s_{min} ist, so erhöht sich der Verbindungswiderstand, weil der Einfluss der Materialwiderstände der Kontaktpartner größer wird. Ist die Verbindung länger als zweimal s_{min}, so sind die Ersatz-Materialwiderstände die Hauptanteile des Verbindungswiderstands (Bild II).

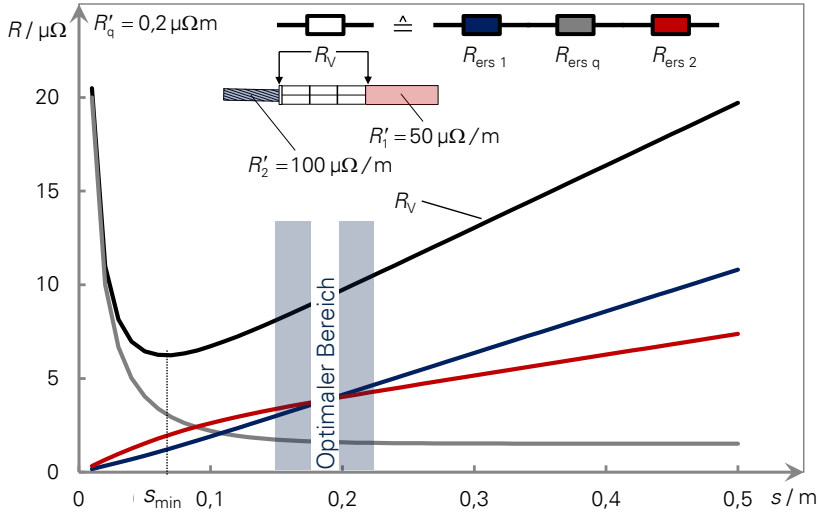
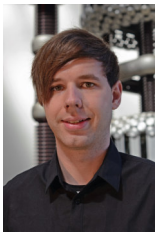


Bild II: Verbindungswiderstand und dessen Anteile abhängig von der Länge *s* der Verbindung

Der Ersatz-Querwiderstand verringert sich mit der Verbindungslänge *s* asymptotisch bis zu einem Grenzwert. Die berechnete Stromverteilung in den Kontaktpartnern liefert die Interpretation dieser Zusammenhänge [2]. In einer langen Verbindung ($s \geq 8\, s_{min}$) sind nur die Mikrokontakte in zwei voneinander unabhängigen Bereichen an den beiden Enden der Verbindung stromdurchflossen. In der Mitte der Verbindung werden die Mikrokontakte von einem sehr geringen Strom durchflossen. Ein Teil der in langen Verbindungen vorhanden Mikrokontakte trägt als nicht zum wirksamen Kontaktwiderstand der Verbindung bei. Demnach ist es nicht sinnvoll, die Verbindung länger als circa sechsmal s_{min} auszulegen. Die Verbindungslänge sollte außerdem mindestens viermal s_{min} betragen, da in kürzeren Verbindungen die Verlustleistung zum Großteil in den Mikrokontakten entsteht. Es ergibt sich ein Bereich für die elektrisch optimale Länge des Verbindungssystems (Bild II). Des Weiteren ist zu prüfen, ob mit dieser Auslegung auch die mechanischen und thermischen Anforderungen erfüllt werden.

[1] Hildmann, C., et. al.: *Einfluss von Kraft- und Formschlussanteil auf das elektrische Kontaktverhalten von Pressverbindungen*. 23. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 2015.
[2] Hildmann, C.: *Elektrisches Modell zum Bewerten des Kontaktverhaltens von elektrischen Verbindungen unter Berücksichtigung der Geometrie*. Jahresbericht des IEEH 2014.



Toni Israel, Dipl.-Ing.

Wechselstrom-Kurzschlussversuche an Kontaktelementen für Hochstrom-Steckverbinder

Zum Übertragen elektrischer Energie werden z. B. bei ortsveränderlichen Betriebsmitteln lösbare Steckverbinder benötigt. In diesen stellen federnde Kontaktelemente eine kraftschlüssige Verbindung zwischen zwei Leitern her. In Energieversorgungssystemen belastetet im Fehlerfall ein Kurzschlussstrom I_K alle Betriebsmittel einschließlich Steckverbinder. Dieser ist oft um den Faktor 10 . . . 20, in einigen Anwendungsfällen bis zu Faktor 35 größer als der Bemessungsstrom I_r. Dieser Strom belastet die Kontaktelemente thermisch und mechanisch. Zum Untersuchen des Kurzschlussverhaltens ist im Hochstromlabor des IEEH ein Versuchsstand für AC-Kurzschlussversuche an Kontaktelementen entstanden (Bild I).

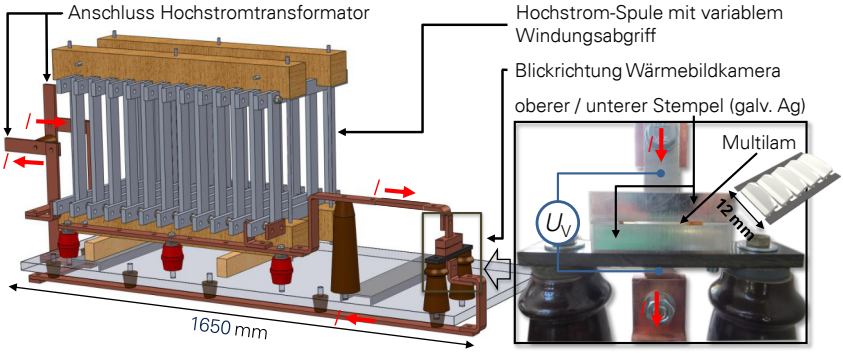


Bild I: Versuchsaufbau zur Belastung von Kontaktelementen (Multilam) mit einem einstellbaren Kurzschlusstrom. $R_V = {}^{U_V}/_{I_{mess}}$

Der Versuchsstand dient dazu, die thermische Beanspruchung des Kontaktelements während, und das Kontaktverhalten vor und nach dem Kurzschluss zu untersuchen. Hierzu nehmen mehrere Messsysteme sowohl die Belastungsgrößen Strom und Temperatur als auch den Verbindungswiderstand und die Federkennlinie der Kontaktelemente auf. Aus den Messwerten ergibt sich der höchstzulässige Kurzzschlussstrom für eine gegebene Kurzschlussdauer. Weiterhin dienen die Ergebnisse zum Verifizieren des bereits erstellten FE-Modells zur elektrisch-thermischen Kurzzeitbelastung von Steckverbindern [1].

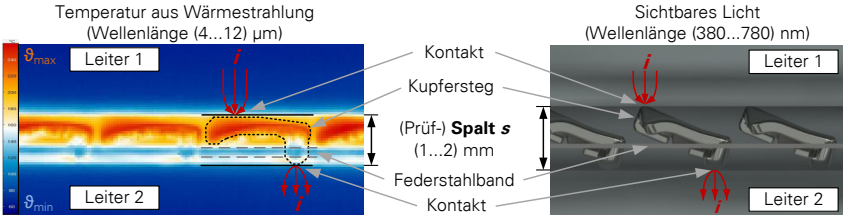


Bild II: Kontaktelement beim Kurzschluss; links: Temperaurmessung mit Infrarotkamera, rechts: Kontaktelement in einem Steckverbinder.

Die Aufnahmen der Wärmebildkamera zeigen, dass der Kurzschlussstrom das Kontaktelement im Vergleich zum Leiter stark thermisch beansprucht (Bild II). Die Maximaltemperatur $\vartheta_{max} \approx 240\,°C$ ist höher als die Entfestigungstemperatur der Silberbeschichtung ($\vartheta_E \approx 180\,°C$ [Holm]), der Kontakt wird durch die kleine thermische Zeitkonstante ($\tau \approx 270\,ms$) aber nur kurzzeitig belastet (Bild III). Nach dem Trennen tritt keine optisch erkennbare Schädigung auf.

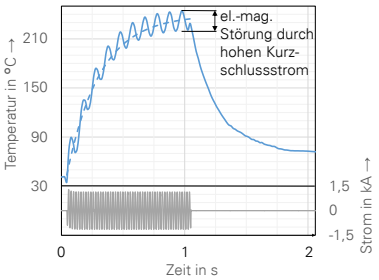


Bild III: Temperaturverlauf $I_K = 800\,A$

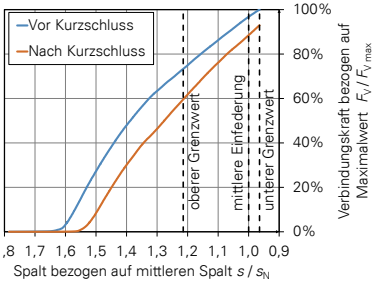


Bild IV: Kontaktkraft

Die Federkennlinie (Bild IV) zeigt, dass nach dem Kurzschluss die Verbindungskraft F_V bei mittlerem Spalt ca. 13 % geringer ist. Dennoch verringert sich R_V während des Kurzschlusses um 16 %, ohne dass Verschweißen auftritt (Mittelwerte aus 3 Messungen). Der verringerte Widerstand deutet in Verbindung mit den gemessenen Temperaturen ϑ_{max} darauf hin, dass die Silberbeschichtung im Kontaktbereich entfestigt. Dadurch vergrößern sich die Mikrokontakte und R_V wird geringer.

Die empirisch gewonnen Daten dienen dazu, ein FE-Modell um das Entfestigungsverhalten der Kontaktmaterialien zu erweitern.

[1] M. Gatzsche, N. Lücke, S. Großmann, T. Kufner, G. Freudiger *Evaluation of Electric-Thermal Performance of High Power Contact Systems with the Voltage-Temperature Relation*. IEEE TCPMT. Early Access. IEEE 2016



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-Sicherungseinsätze. Durch eine zunehmende Sekundäreinspeisung in Niederspannungsnetzen werden Verteil- zu Einspeisestationen mit gleichzeitig anhaltend hoher Strombelastung. Kostendruck und ein steigendes Sicherheitsbedürfnis führen zudem zu immer kompakteren und stärker gekapselten Anlagen. Eine stetig steigende thermische Beanspruchung des gesamten Sicherungseinsatzes ist die Folge. Bei NH-gG-Sicherungseinsätzen spielt vor allem der temperaturabhängige Prozess der Interdiffusion zwischen dem Schmelzleiter und dem Lotauftrag eine wichtige Rolle, der bei sehr hoher thermischer Beanspruchung zu einer beschleunigten Alterung des Schmelzleiters bereits im Normalbetrieb und zu Fehlabschaltungen und Schaltversagen führen kann. Die maximale Schmelzleitertemperatur ist dabei das maßgebliche Kriterium für einen zuverlässigen Betrieb der Sicherungseinsätze. Jedoch fehlen in der Praxis bisher belastbare Kriterien wie Grenztemperaturen, die einen zuverlässigen Betrieb der Sicherungseinsätze in der Einbausituation sicherstellen.

In experimentellen Untersuchungen wird daher das Langzeitverhalten von unterschiedlichen Schmelzleitern für gG-Sicherungseinsätze untersucht, mit dem Ziel, materialabhängige Grenztemperaturen für Schmelzleiter herzuleiten. In Vorversuchen wurde dabei zunächst die Temperaturverteilung im Engstellenbereich der Schmelzleiter unter Praxisbedingungen untersucht. Mit einer Wärmebildkamera mit Makroobjektiv wurde die Temperaturverteilung im stromdurchflossenen Zustand gemessen und mit gemessenen Temperaturen aufgeklebter Thermoelemente verglichen (Bild I).

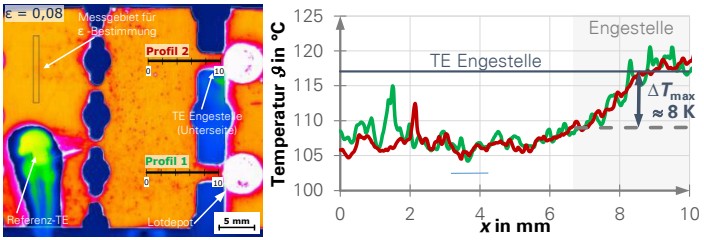


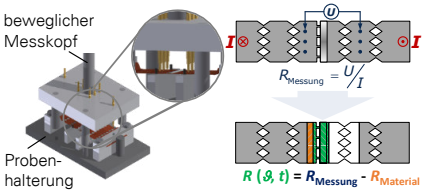
Bild I: Temperaturverteilung entlang der Engstelle eines Schmelzleiters

Die Ergebnisse zeigen, dass die Temperaturmessung mit Thermoelementen auch bei sehr filigranen Strukturen mit guter Genauigkeit möglich ist. Die gemessenen Temperaturen mit der Wärmebildkamera und dem Thermoelement stimmen mit guter Genauigkeit überein und auch ein Beeinflussen der Temperaturverteilung durch das Aufkleben eines Thermoelementes wurde nicht festgestellt. Im Vergleich zur homogenen Temperaturverteilung bei Auslagerung im Wärmeschrank, wird im stromdurchflossenen Versuch ein deutlicher Temperaturgradient entlang der lotbeschichteten Engstelle festgestellt, der zu einer gerichteten Interdiffusion führen und damit das Alterungsverhalten der Schmelzleiter beeinflussen kann.

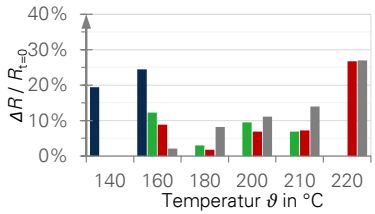
In anschließenden Langzeitversuchen wurden vier Schmelzleitertypen (Bild II) bei unterschiedlichen Temperaturen sowohl im Wärmeschrank als auch bei ausgewählten Temperaturen in stromdurchflossenen Versuchen thermisch beansprucht. Zum Bewerten des Alterungsverhaltens wurde periodisch der Widerstand der Engstelle bei Umgebungstemperatur gemessen (Bild II).

Typ	Material		ϑ_S Lot in °C
A	Cu	SnBiCu	165-215
B	Cu	SnAg	221
C	Cu	SnCu	227
D	Cu	SnCd	178-200

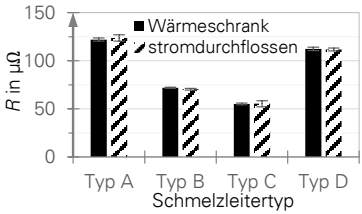
(a) Schmelzleitertypen



(b) Messprinzip



(c) Ergebnisse der Versuche im Wärmeschrank



(d) Vergleich Wärmeschrank und stromdurchflossen

Bild II

Die gemessenen Widerstände zeigen bei den Versuchen im Wärmeschrank einen signifikanten Diffusionseinfluss abhängig von der Temperatur und des eingesetzten Lotes (Bild II). Verglichen mit stromdurchflossenen Versuchen konnte dabei kein zusätzlicher Einfluss einer inhomogenen Temperaturverteilung auf die Alterung des Schmelzleiters durch Interdiffusion festgestellt werden.

In weitergehenden Untersuchungen werden mit gealterten und neuen Schmelzleitern Schaltversuche durchgeführt, um den Einfluss der erhöhten Widerstände auf die Funktion der Schmelzleiter quantifizieren zu können und auf der Basis dieser Ergebnisse letztlich Grenztemperaturen der Schmelzleiter für einen zuverlässigen Betrieb herzuleiten.



Stephanie Pfeifer, Dr.-Ing.

Einfluss der Sauerstoffdiffusion auf die Alterung stromtragender Verbindungen mit beschichteten Kontaktpartnern

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

In Vorversuchen an verschieden galvanisch beschichteten Blechen wurde festgestellt, dass Silberschichten auf Aluminiumleitern für Sauerstoff durchlässig sind [1]. Durch das Anreichern von Sauerstoff in der Silberschicht steigt die Wahrscheinlichkeit, dass die Grundmaterialien unter der Beschichtung oder der unbeschichtete Kontaktpartner oxidieren. Ziel der aktuellen Untersuchungen ist es, die Sauerstoffdiffusion als möglichen Alterungsmechanismus zu untersuchen. Es wurden Aluminiumzylinder stirnseitig mit Silber beschichtet* und in einer Halterung gefügt (Bild I).

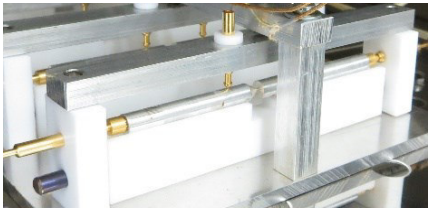


Bild I: Versuchsaufbau Halterung

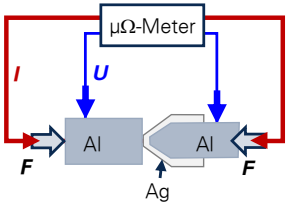


Bild II: Widerstandsmessung

Die Proben wurden im Wärmeschrank bei verschiedenen Temperaturen gealtert. In regemäßigen zeitlichen Abständen wurde der Widerstand über der Fügezone gemessen. Die Kontaktkraft wird über Federkontakte aufgebracht, über die gleichzeitig der Messstrom eingespeist wird. Die Spannung wurde ebenfalls mit Federkontakten über eine Länge von 20 mm abgegriffen (Bild II). Der so bestimmte Widerstand der Fügestelle setzt sich aus Materialwiderstand und Kontaktwiderstand zusammen. Es wird zeitabhängig eine Änderung des Kontaktwiderstands aufgrund von Alterungsprozessen erwartet. Unter der Annahme, dass der Materialwiderstand konstant, und im Ausgangszustand keine Fremdschichten bzw. intermetallischen Phasen vorhanden sind, kann über die Beziehung

$$q_K = \frac{R_K(t>0)}{R_K(t=0)} = \frac{R_V(t>0) - R_M}{R_V - R_M} = \frac{R_E + R_{IMP} + R_F}{R_E} \qquad (1)$$

die Änderung des Kontaktwiderstands als Faktor ermittelt werden.

*Das Herstellen der Beschichtungen erfolgte beim Projektpartner „fem – Forschungsinstitut Edelmetalle + Metallchemie“ in Schwäbisch Gmünd.

Im betrachteten Zeitraum sind die Widerstände aller Verbindungen angestiegen. Eine Abschätzung der Dicke der IMP zum aktuellen Zeitpunkt ergab, dass der Anstieg des Widerstandes bei bedseitig beschichteten Kontaktpartnern mit hoher Wahrscheinlichkeit durch das Wachsen der IMP bestimmt wird. Die genaue Dicke der IMP muss noch durch metallografische Untersuchungen ermittelt werden. Ist das gesamte Silber aufgebraucht, stoppt das IMP-Wachstum. Ein weiteres Ansteigen des Widerstandes könnte dann auf den Einfluss von Diffusionsprozessen im Zusammenhang mit Sauerstoff zurückgeführt werden. Die Untersuchungen werden entsprechend weiter fortgeführt.

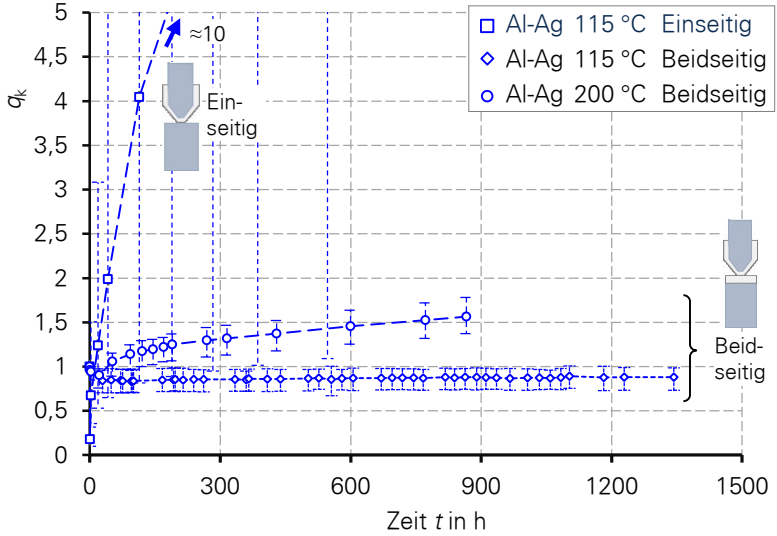
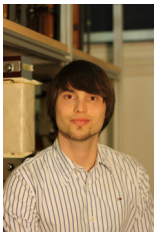


Bild III: Widerstandsänderung q_K von Verbindungen mit direkt versilberten zylindrischen Leitern aus Al abhängig von der Temperatur und der Zeit

Ist nur einer der beiden Kontaktpartner versilbert, kann der Anstieg nicht mehr auf das Bilden von IMP zurückgeführt werden. Aufgrund der hohen Sauerstoffaffinität von Aluminium ist hier denkbar, dass der in den oberen Lagen der Silberschicht eingelagerte Sauerstoff aus dieser in Richtung der blanken Aluminium-Probe diffundiert und dort mit dem Aluminium reagiert. Eine abschließende Aussage ist erst nach metallografischen Untersuchungen möglich, die nach Abschluss der Versuche durchgeführt werden. Diese These muss noch indirekt durch identische Versuche in Schutzgasatmosphäre bestätigt werden.

[1] Pfeifer, S.: *Einfluss der Sauerstoffdiffusion auf die Alterung stromtragender Verbindungen mit beschichteten Kontaktpartnern*, IEEH Jahresbericht 2015
[2] Pfeifer, S. et al.: *Characterization of Intermetallic Compounds in Al-Ag Bimetallic Interfaces.* International Conference on Electrical Contacts 2014, Dresden

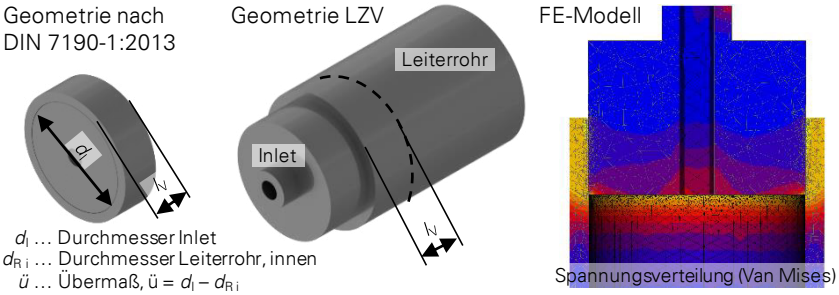


Alexander Ramonat, Dipl.-Ing

Kraftschluss in längs- und quergepressten Verbindungen von zylindrischen Leitern aus Aluminium

Um den Fertigungsaufwand und damit die Kosten von stromführenden Verbindungen in gasisolierten Schaltanlagen und Leitungen zu reduzieren, wird nach alternativen Verbindungstechnologien für zylindrische Leiter aus Aluminium gesucht. Stand der Technik ist das Verbinden der Leiterrohre mit Adaptern in Form von Vollzylindern (Inlets) durch federnde Kontaktelemente. Als Alternativen werden das Längs- und Querpressen, sowie die Elektromagnetische Pulstechnologie (EMPT) untersucht [1]. In Langzeitversuchen (LZV) bei konstanter Temperatur im Wärmeschrank sowie bei kontinuierlicher AC-Strombelastung werden das elektrische Kontakt- und Langzeitverhalten betrachtet. Neben den elektrischen Eigenschaften der Verbindungen werden vorrangig bei den längs- und quergepressten Verbindungen die mechanischen Eigenschaften im Kontaktbereich betrachtet. Ziel ist es, Zusammenhänge zwischen dem elektrischen Kontaktverhalten und den mechanischen Eigenschaften zu erhalten, diese zu verallgemeinern und mit anderen Verbindungssystemen mit flächigem Kontakt zu vergleichen.

Im Bereich des Maschinenbaus werden Längs- und quergepresste Verbindungen auf Basis der Gestaltungsregeln der DIN 7190-1:2013 ausgelegt. Mit den analytischen Berechnungsgrundlagen kann eine gleichmäßig auf die Fläche wirkende mechanische Spannung abhängig vom Übermaß $\ddot{u}$ unter der Annahme gleich langer Kontaktpartner (Bild I) und elastischer Verformung berechnet werden. Beim Auftreten geringer plastischer Verformung ist in der Norm ein stark vereinfachtes Berechnungsverfahren gegeben.



d_I … Durchmesser Inlet
d_{Ri} … Durchmesser Leiterrohr, innen
$\ddot{u}$ … Übermaß, $\ddot{u} = d_I - d_{Ri}$

Bild I: Geometrie der Verbindung nach DIN 7190-1, im Vergleich zur Geometrie der Langzeitversuche und der FE-Modelle

Aus elektrotechnischer Sicht können bei den Verbindungen auch plastische Verformungen zugelassen werden, solange die elastische Rückfederung des Leiterrohrs ausreichend groß ist oder es zum Kaltverschweißen der Kontaktpartner kommt, wie es beim Längspressen aufgrund der großen Relativbewegung möglich ist. Zudem sind die geometrischen Vereinfachungen nach DIN 7190-1 weder für die Geometrie der Langzeitversuche noch für die praktische Anwendung hinreichend. So ist im Randbereich der Verbindungen mit Spannungsüberhöhungen zu rechnen, die ggf. das elektrische Kontaktverhalten deutlich beeinflussen können (Bild I). Zusätzlich wird das Materialverhalten der eingesetzten Leitermaterialien, wie z. B. Kaltverfestigen, nur unzureichend berücksichtigt. Es wurden daher die Geometrien und die Fügeprozesse mit der Finite-Elemente-Methode nachgebildet und berechnet. Das Materialverhalten von Leiterrohr und Inlet wurde aus Zugversuchen bestimmt und durch ein Materialmodell für Plastizität im FE-Modell hinterlegt.

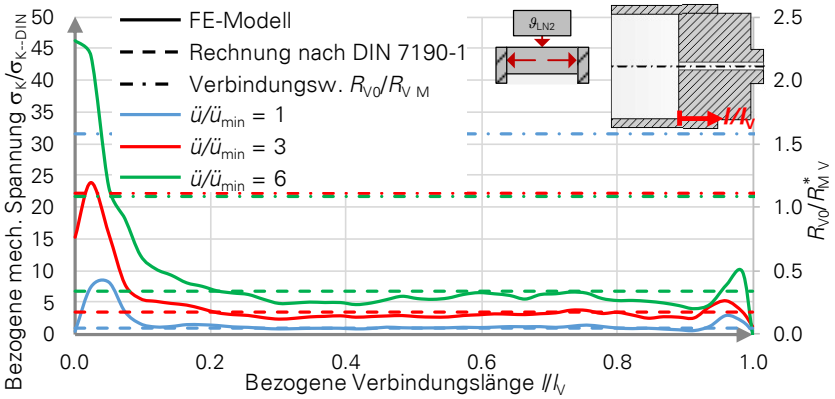


Bild II: Spannungsverteilung im Kontaktbereich quergepresster Verbindungen, Spannungen bezogen auf berechneten Wert für $\ddot{u}/\ddot{u}_{min}$ = 1 (DIN 7190-1)

Im mittleren Bereich der Verbindung ($0{,}2 \leq l/l_V \leq 0{,}9$) stimmen die analytisch berechneten mechanischen Spannungen gut mit den Spannungen des FE-Modells überein. Beim größten untersuchten Übermaß treten kleine plastische Verformungen am Leiterrohr auf, sodass für diesen Fall die Differenz zu der analytisch berechneten Spannung am größten ist. Die Spannungsüberhöhungen im Bereich $l/l_V < 0{,}2$ sind deutlich größer als bei $l/l_V > 0{,}9$. Aufgrund der sehr ungleichmäßigen Spannungsverteilung ist es möglich, dass die verschiedenen Bereiche der Verbindung unterschiedlich stark von der Alterung beeinflusst werden. Die FE-Modelle können zusätzlich genutzt werden, um die Verbindungsgeometrie hinsichtlich der Spannungsverteilung zu optimieren.

[1] A. Ramonat: *Jahresbericht des IEEH 2015*, Dresden, 2015

* $R_{M\,V}$ . . . Mit FE-Berechnung bestimmter Materialwiderstand der Verbindung bei idealer Kontaktierung



Stephan Schlegel, Dr.-Ing.

Langzeitverhalten stromführender Verbindungen

Am Lehrstuhl für Hochspannungs- und Hochstromtechnik werden seit fast 40 Jahren Untersuchungen zum Langzeitverhalten stromführender stationärer Verbindungen durchgeführt. Der Forschungsschwerpunkt entstand durch Fragestellungen zum Thema Kontakt- und Langzeitverhalten von Verbindungen mit Kontaktpartnern aus Aluminium und wurde innerhalb kurzer Zeit um weitere Leitermaterialien, Beschichtungen und Verbindungssysteme unter Berücksichtigung aktueller Anforderungen in den praktischen Anwendungen erweitert (Bild I).

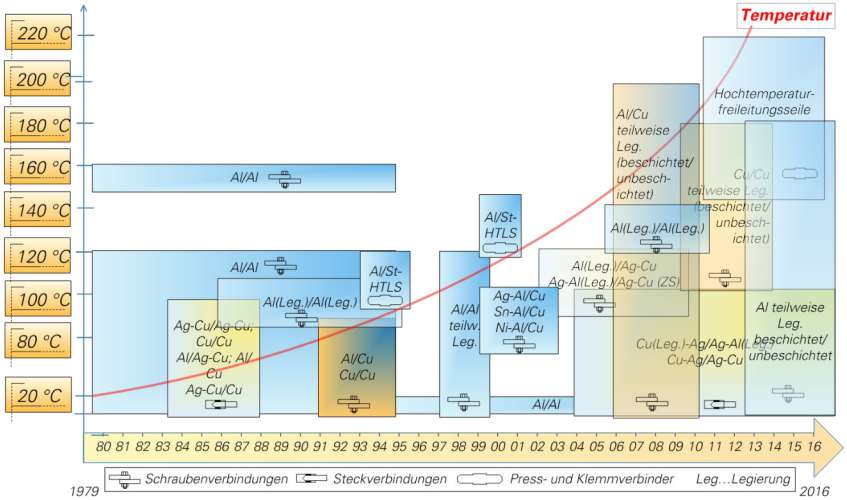


Bild I: Übersicht der Forschungsschwerpunkte stromführender Verbindungen [1]

Die Vielfalt der Anwendungen und die Strombelastbarkeit haben sich in den letzten Jahren, verbunden mit der Forderung nach hoher Zuverlässigkeit und Sicherheit, immer weiter erhöht. Neue Anwendungen wie z. B. in der Elektromobilität oder bei regenerativen Elektroenergieanlagen führen zu immer höheren Einsatztemperaturen, die einen direkten Einfluss auf die Lebensdauer der Verbindungen haben. Die Kontaktphysik und Alterung stromführender Verbindungen zu verstehen, wird daher immer wichtiger. Hierzu wurden insbesondere Grundlagenun-

tersuchungen am System Schraubenverbindungen mit Stromschienen durchgeführt. Ziel war und ist es Grenztemperaturen für den Einsatz zu bestimmen, die zu keiner unzulässigen Alterung der Verbindung innerhalb der geplanten Lebensdauer führt (Bild II). Um die physikalischen Zusammenhänge verstehen zu können, ist eine interdisziplinäre Betrachtung notwendig, die Bereiche der Werkstofftechnik, Metallphysik, Fügetechnik und Elektrotechnik beinhaltet. In zahlreichen experimentellen Untersuchungen wurde der Einfluss von Beschichtungssystemen, von Verbindungs- und Kontaktelementen, die Vorbehandlung, die Montageparameter und die Oberflächentopografie auf das Kontaktverhalten untersucht. Zudem wurden die Mechanismen der Alterung durch Kraftabbau, Interdiffusion, Fremdschichtbildung, Elektromigration und Reibverschleiß in Langzeitversuchen betrachtet und Modelle entwickelt, um die Wirkung auf den Verbindungswiderstand abhängig von der Zeit zu beschreiben. Die bisherigen Erkenntnisse führen zu klaren Aussagen, die das Abschätzen der Lebensdauer von Schraubenverbindungen ermöglichen (Bild II).

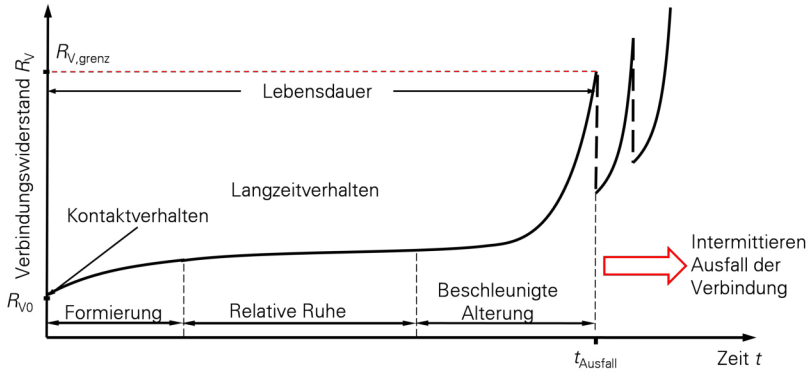


Bild II: Lebensdauerkennlinie einer stromführenden Verbindung (schematisch)

Zudem können grundlegende Aussagen verallgemeinert und auf andere Verbindungssysteme übertragen werden. Die Erkenntnisse zusammenzufassen ist die Basis für weitere Forschungsarbeiten, mit dem Ziel zukünftig weiter an einem geschlossenen Modell zur Berechnung der Lebensdauerkennlinie zu arbeiten. Speziell für Schraubenverbindungen mit Stromschienen ist ein Stand erreicht der es zulässt, aktuell gültige Dokumente zur Konstruktion, zur Montage zum Betrieb und zur Prüfung dieser Verbindungen zu vereinheitlichen und zu erweitern. Damit soll zukünftig neben der mechanischen Dimensionierung die Strombelastbarkeit über der Betriebszeit berücksichtigt werden.

[1] Schlegel, S., et al: *Functional Analysis and Evaluation of the Long-term stability of Static Contacts and Joints of Electrical Power Engineering.* Tagung - Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, ETG-VDE, Fulda 2012

Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Hochspannungstechnik“



Khaled Helal, M.Sc.

Impact of small cavities on partial discharge behavior in oil-paper insulation system under the effect of DC electric stress

High voltage direct current (HVDC) technology has been widely used since its first commercial operation in 1954. It has been applied all over the world for bulk power transmission over long distances with low amount of losses. It is also applied in order to transmit power through submarine cables and to interconnect two asynchronous systems [1].

The converter transformer can be considered as one of the most important components of HVDC transmission system. The durability of the converter transformer insulation system is one of the main concern for electric power utilities all over the world in the present time. As a result of the wide increase in converter transformer usage, it is very important to make its insulation system as reliable as possible.

Partial discharge (PD) measurement is a common method for monitoring high voltage equipment and can detect insulation defects before they lead to a complete insulation breakdown. By monitoring PD activity, different parameters would be extracted. These parameters can be correlated to PD sources, and consequently the defects in the insulation system can be detected by analysing these PD pattern [2].

Oil-paper insulation has been widely used in power transformer, power cables and HVDC equipment because of its low cost and high dielectric strength of this insulation system [3].

Small gas bubbles can be formed in transformer oil due to aging or previous PD, however cavities inside the paper insulation may appear because of a defect in the manufacturing process or the ageing of the insulation materials [2]. The electric field inside the cavity is high compared to the surrounding insulation material. Because of the high electric field in the cavity and its low dielectric strength, PD activities will take a place when high voltage is applied. These PD activities in the cavity, over the time, will degrade the insulation and finally a complete failure can occur. PD characteristics in the presence of cavities in the oil-paper insulation system of the transformer have been not fully studied especially when HVDC is applied.

It was previously assumed that the dielectric behavior of insulating materials can be fully described according to their permittivity and conductivity (RC-linear models). There are results that contradict with these models as a base to des-

cribe the dielectric behavior [4]. The drift of ions either in paper or in oil makes the linear models insufficient to describe such dielectric behavior when HVDC is applied. Another investigation showed that dielectric phenomena of oil-paper insulation system when stressed by HVDC is depending on the charge carriers drift within the insulation system [5, 6]. In the present work PD characteristics in the presence of air cavity defect will be studied taking into account the effect of charge carriers drift within the insulation system when HVDC is applied. Figure I shows the two models that will be implemented to study such kind of defects.

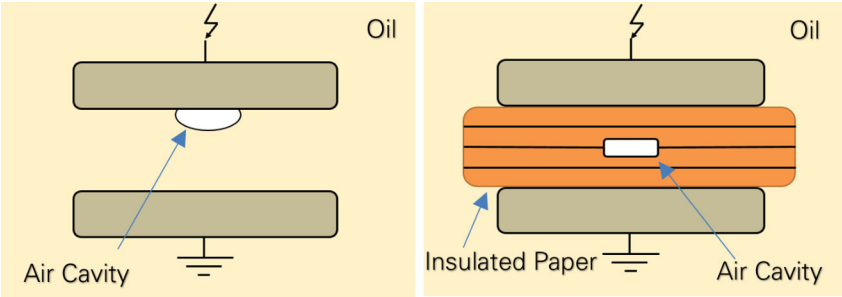


Bild I: Model of air cavity defects initiated in oil and oil-paper-insulation system

[1] G. Bhuvaneswari, B. C. Mahanta, *Analysis of Converter Transformer Failure in HVDC Systems and Possible Solutions*, IEEE Transaction on Power Delivery , Vol. 24, No. 2, April 2009.
[2] M.G.Niasar, *Partial Discharge Signatures of Defects in Insulation Systems Consisting of Oil and Oil-impregnated Paper*, Licentiate Thesis, KTH School of Electrical Engineering, Sweden 2012.
[3] C.Tang, G. Chen, M. Fu, R.J. Liao, *Space Charge Behavior in Multilayer Oil-paper Insulation under Different DC Voltages and Temperatures*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010.
[4] A. Zouaghig, A. Beroual, *Barrier Effect on the Dielectric Strength of Oil Gaps under DC Voltage*, Conference record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Arlington, Virginia, USA, , 1998.
[5] K. Backhaus, J. Speck, S. Großmann, T. Fritze, R. Fritsche, M. Schenk, *Dielectric Strength and Conductivity Behavior of Oil-Paper Insulation*, XVII International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, 2011.
[6] K. Backhaus, J. Speck, S. Großmann, R. Fritsche, *Ion Concentration Triggered Breakdown of Oil-Paper-Insulation at High DC Voltage and Evaluation by FEM*, 18th International Symposium on High Voltage Engineering, South Korea, 2013.



Thomas Götz, Dipl.-Ing.

Gasisolierte Systeme bei Gleichspannungsbelastung

Die weltweit zunehmende Integration regenerativer Energiequellen in eine moderne und nachhaltige Energieversorgung erfordert einen verlustarmen Transport großer Energiemengen über weite Entfernungen. Dabei ist die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) der bewährten Drehstromtechnologie wirtschaftlich überlegen oder stellt für einige Anwendungen die einzige technische Möglichkeit dar. Im Hinblick auf neue Erfordernisse der Energieübertragung wird es notwendig, die seit den 1960er Jahren verwendeten gasisolierten Systeme auch bei Gleichspannungsbelastung einsetzen zu können. Dabei treten eine Vielzahl von Herausforderungen auf.

Bei der dielektrischen Dimensionierung von Gleichspannungsanlagen muss im Gegensatz zur Wechselspannungsbelastung sowohl die kapazitive als auch die resistive Feldstärkeverteilung beachtet werden, da nach dem Zuschalten der Gleichspannung eine Feldumbildung stattfindet [1]. Dabei kann sich der Ort und der Wert der Höchstfeldstärke ändern. Neben der Temperatur der Isolierwerkstoffe beeinflussen auch zusätzliche Ladungsträger, welche infolge von Teilentladungen oder an blanken Elektroden bereitgestellt werden, die zeitabhängige Festigkeit des Isoliersystems [2]. Die derzeit durchgeführten Untersuchungen betrachten dabei den Einfluss einer dielektrischen Beschichtung der Elektrodenoberfläche auf die elektrische Festigkeit des Isoliersystems in Abhängigkeit der Dauer der Gleichspannungsbelastung. Erwartet wird, dass die Feldumbildung infolge der im Vergleich zur Anordnung mit blanken Elektroden geringeren Anzahl freier Ladungsträger im System und der dadurch veränderten Leitfähigkeiten der Isolierwerkstoffe langsamer abläuft.

Auch bei der Untersuchung des Teilentladungsverhaltens von druckgasisolierten Systemen bei Gleichspannungsbelastung treten Effekte auf, welche bei Wechselspannung nicht bekannt sind und die mit den gängigen physikalischen Modellen nicht erklärt werden können. Dazu zählen:

- Verlöschen und Wiederzünden von Teilentladungen im Abstand von mehreren Stunden ohne Spannungsänderung [1]
- Starke Zeitabhängigkeit der TE-Aktivität [1]
- Signifikante Differenzen zwischen berechneten und gemessenen Teilentladungseinsetzspannungen [1]
- Beeinflussung von aufeinanderfolgenden Entladungsimpulsen [1]

Die physikalischen Ursachen für diese Effekte müssen unter Berücksichtigung der nur bei Gleichspannungsbelastung auftretenden Prozesse einer gerichteten Ladungsträgerbewegung, impulsloser Entladungen und dem Aufbau von Raum- und Oberflächenladungen näher betrachtet werden.
Eine weitere Herausforderung bei gasisolierten Systemen stellt die sogenannte „F-Gase Verordnung" [3] dar. Diese sieht vor die Emission von bestimmten fluorierten Treibhausgasen, unter anderem SF_6, bis zum Jahr 2030 um 70 % zu reduzieren. Deshalb rücken alternative Isoliergase mit einem deutlich geringeren Treibhauspotential als SF_6 zunehmend in den Fokus der Schaltanlagenhersteller. Diese Gase werden zukünftig nicht nur bei Wechsel-, sondern auch bei Gleichspannungsbelastung zum Einsatz kommen müssen. Für Hochspannungsanwendungen existieren derzeit Pilot- bzw. Prototypanlagen mit den folgenden Gasen:

- Synthetische Luft [4]
- Gasgemisch aus fluorierten Ketonen und CO_2 bzw. O_2 [5]
- Gasgemisch aus fluorierten Nitrilen und CO_2 [6]

Im Hinblick auf das dielektrische und thermische Verhalten, das Gashandling und die notwendigen höheren Betriebsdrücke bieten die derzeit getesteten Gase unterschiedliche Vor- und Nachteile. Nach derzeitigem Kenntnisstand kann keine Aussage darüber getroffen werden, welches dieser Gase zukünftig Verwendung finden wird. Allerdings besteht in Fachkreisen die eindeutige Meinung, dass es im Sinne der Anwenderfreundlichkeit nicht sinnvoll ist verschiedene Gase einzusetzen.

Die derzeitige Forschung konzentriert sich auf das Verhalten bei Wechsel- und Impulsspannung. In zukünftigen Untersuchungen muss jedoch auch das Durch-, Überschlag-, Teilentladungs- und Alterungsverhalten bei Gleichspannung und überlagerten Spannungen, bestehend aus Gleich- und Impulsspannung, untersucht werden.

[1] M. Hering *Überschlagsverhalten von Gas-Feststoff-Isoliersystemen unter Gleichspannungsbelastung*. Dissertation, TU Dresden, 2016
[2] M. Hering, T. Götz, J. Speck, S. Großmann, U. Riechert *Influence of space charges on the field transition in gas-insulated DC systems*. International Conference on Dielectrics Montpellier, 2016.
[3] Amtsblatt der Europäischen Union, *Verordnung (EU) Nr. 517/2014 über fluorierte Treibhausgase und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 842/2006*.
[4] N. Presser, C. Orth et al. *Advanced insulation and switching concepts for next generation High Voltage Substations*. CIGRÉ Session, Paris, 2016.
[5] T. Diggelmann, D. Tehlar, P. Mueller *170 kV pilot installation with a ketone based insulation gas with first experience from operation in the grid*. CIGRÉ Session, Paris, 2016.
[6] K. Pohlink, F. Meyer et al. *Characteristics of a fluoronitrile/CO_2 mixture - an alternative to SF_6*. CIGRÉ Session, Paris, 2016.



Karsten Backhaus, Dr.-Ing.

Elektrische Leitfähigkeit und Feldsteuereigenschaften Siliziumcarbid gefüllter Harze für Hochspannungsmaschinen

Feldstärkesteuernde Materialien auf Siliziumcarbid(SiC)-Basis sind Stand der Technik seit mehreren Jahrzehnten in rotierenden Hochspannungs-maschinen. An den Nutausgängen bilden der geerdete Kern, die Hauptisolierung (HI) aus harzgetränktem Glimmerband und die hochspannungsführenden Leiter durch die geometrischen Verhältnisse eine Gleitentladungsanordnungen. Am Ende des Nutenglimmschutzbandes (NGS) und der umgebenden Luft würden sich sehr hohe Feldstärken ergeben, welche Teilentladungen und damit eine Schädigung der Isolierung provozieren.

Aus diesem Grund wird für Hochspannungsmaschinen unterschiedlicher Spannungsklassen ein zusätzlicher Endenglimmschutz (EGS) vorgesehen. Die mit kleinen SiC-Körnern gefüllte Harzverbundschicht soll durch eine nichtlineare, feldstärkeabhängige Leitfähigkeit die Feldstärke im Nahbereich auf einen Betrag unterhalb des Streamer-Spannungsbedarfs von 5 kV/cm steuern – Bild I.

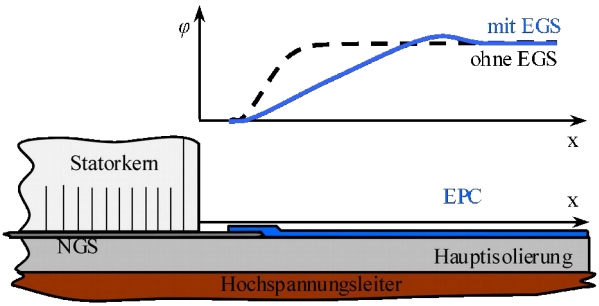


Bild I: Prinzipielle Potential- und Feldstärkeverteilung am Nutausgang einer Hochspannungsmaschine

Für eine optimale Dimensionierung des Endenglimmschutzes mit SiC-gefüllten Bändern muss zunächst das Leitfähigkeitsverhalten bekannt sein. Die von den Halbzeug-Lieferanten üblicherweise mit Gleichspannung durchgeführten Messungen an ungetränkten Halbzeugen sind hierzu nicht geeignet. Sowohl das Tränkmittel als auch die individuellen Verarbeitungsparameter beim Maschinenhersteller können das Leitfähigkeitsverhalten erheblich beeinflussen. Um eine Berechenbarkeit des Steuerverhaltens zu erreichen, werden Prüflinge verwendet, welche

sowohl im Isolieraufbau mit Hauptisolierung und Steuerschicht als auch in der Herstellung realen Maschinenisolierungen gleichen – Bild II. Daher erfolgt die dielektrische Charakterisierung auch bei Wechselspannung.

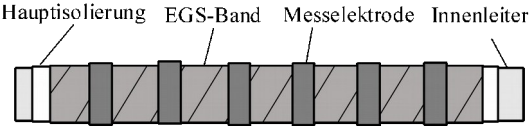


Bild II: Prüfling zur Messung der Leitfähigkeitscharakteristik

Die Leitfähigkeitseigenschaften der so untersuchten EGS-Bänder variieren über mehrere Größenordnungen - Bild III.

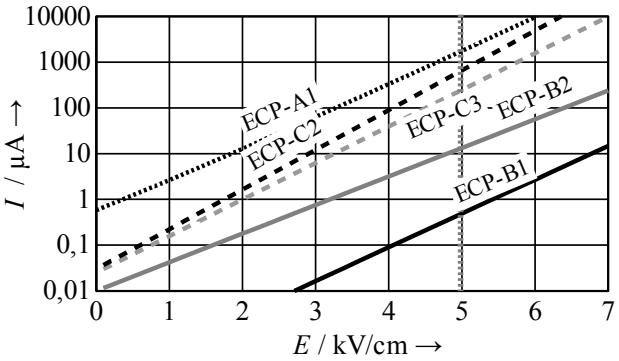


Bild III: Feldstärkeabhängiges Leitfähigkeitsverhalten verschiedener

Neben der Feldstärkeabhängigkeit der Leitfähigkeit besteht auch eine in bisherigen Arbeiten zu dieser Thematik weniger beachtete aber signifikante Temperaturabhängigkeit. So muss bei Temperaturen größer 150 °C mit einem gänzlichen Ausbleiben der Leitfähigkeits- und Steuereigenschaften gerechnet werden. Diese Temperaturabhängigkeit spielt aber eine umso wichtigere Rolle bei dem im steigenden Umfang aufkommenden Umrichterbetrieb von Hochspannungsantrieben. Die dann wirkenden, steilen Spannungsimpulse haben hohe Verschiebungsströme zur Folge, die der EGS resistiv tragen muss und damit eine gegenüber dem Wechselspannungsbetrieb gesteigerte Erwärmung verzeichnet wird.



Tobias Gabler, Dipl.-Ing.

Untersuchungen zum Durchschlagverhalten von Öl-Papier-Isolierungen bei Gleichspannungsbelastung

Das dielektrische Verhalten von Isolierwerkstoffen wird nach aktuellem Stand der Technik entsprechend deren Permittivität und Leitfähigkeit beschrieben (*RC*-Netzwerkmethode). Jedoch gibt es widersprüchliche Ergebnisse, welche mit diesem Standardmodell nicht erklärt werden können. So zeigten Versuche in [1] unterschiedliche Durchschlagspannungen einer Anordnung in einem offenen Ölvolumen in Abhängigkeit des Ölfüllstandes im Prüfgefäß oder Messungen in [2] eine erhöhte Feldstärke vor den Elektroden, welche auf stabile Raumladungsschichten zurückzuführen ist.

In [3] wurde das dielektrische Verhalten der Öl-Papier-Isolierung anhand der *Poisson-Nernst-Planck*-Gleichung (PNP) vorgestellt. Es beschreibt die Drift von Ladungsträgern im Öl und im Papier sowie deren Einfluss auf die Feldstärkeverteilung im System. Dabei ergeben sich signifikante Unterschiede in der Verteilung der Feldstärke zwischen dem *RC*- und dem PNP-Modell im stationären Zustand, wie es am Beispiel einer blanken, planparallelen Plattenanordnung gezeigt wird (Bild I) [4]. Weitere Berechnungen an Anordnungen mit nur einer isolierten Elektrode ergeben wesentlich höhere Feldstärken vor dem Papier, bei beidseitig isolierten Elektroden werden niedrigere Feldstärken ermittelt [4]. Beide Anordnungen zeigen damit ebenfalls große Diskrepanzen zwischen *RC* und PNP [4].

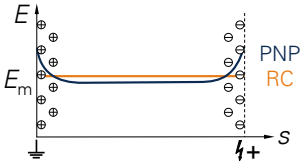


Bild I: Qualitative Feldstärkeverteilung nach PNP und *RC* für die blanke Elektrodenanordnung bei hoher positiver Gleichspannung [4]

Um die Ergebnisse der PNP-Modellierung zu verifizieren, wurden Durchschlagversuche an einer planparallelen Elektrodenanordnung durchgeführt. Dabei wurden Anordnungen mit blanken Elektroden (b-b), mit papierisolierter Hochspannungs- und blanker Erdelektrode (i-b) und mit isolierter Hochspannungs- und Erdelektrode (i-i) untersucht, wobei das Messvolumen mit einer Barriere

aus Transformerboard abgeschlossen wurde. Um den Einfluss des umgebenden Ölvolumens auf die Durchschlagspannung bei Gleichspannungsbelastung zu untersuchen, wurden zusätzlich Versuche mit blanken Elektroden an der offenen Anordnung durchgeführt (Bild II).

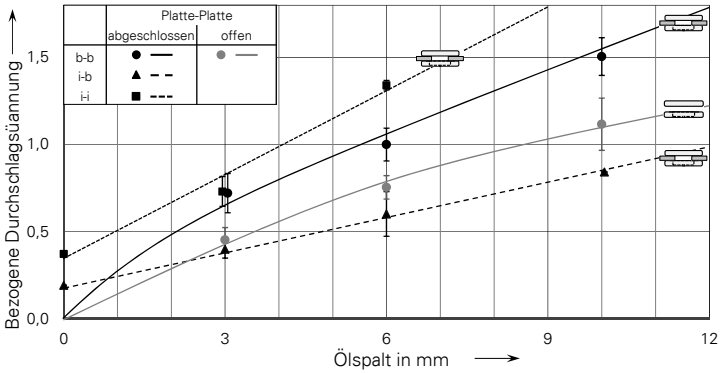


Bild II: Ergebnisse der Durchschlagversuche [4]

Es kann gezeigt werden, dass die Durchschlagspannung bei einer einseitig isolierten Anordnung (i-b) durch den Stau der Ladungsträger vor der Papierbarriere deutlich geringer ist, als bei der blanken Anordnung [4]. Hingegen sind bei der vollständig isolierten Anordnung (i-i) deutlich höhere Durchschlagspannungen ermittelt worden, da sich aufgrund der nun mit Ladungsträgern gefluteten Barrieren im Ölspalt eine homogene Feldstärkeverteilung einstellt [4]. Die Ergebnisse bestätigen, dass das PNP-Berechnungsmodell das dielektrische Verhalten der Öl-Papier-Isolierungen sehr gut nachbildet.

Des Weiteren wird gezeigt, dass die Durchschlagspannung der Anordnung bei Gleichspannungsbelastung vom äußeren Ölvolumen beeinflusst wird, was sich an stark verringerten Durchschlagspannungen im Vergleich zur abgeschlossenen Anordnung zeigt. Die aus dem äußeren Ölvolumen zusätzlich eingebrachten Ladungsträger beeinflussen die Feldstärkeerhöhung vor den Elektroden somit erheblich [4].

[1] A. Zouaghi et al.: *Barrier Effect on the Dielectric Strength of Oil Gaps under DC Voltage*. In: Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, S. 640-643.

[2] Hikita, M. et al.: *Kerr Electro-Optic Field Mapping and Charge Dynamics in Impurity-doped Transformer Oil*. In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Band 3, Nr. 1, S. 80-86, 1996.

[3] Backhaus, K.: *Das dielektrische Verhalten der Öl-Papier-Isolierung bei Belastung mit hoher Gleichspannung*. Dissertation, TU Dresden. 2016.

[4] Gabler, T.; Backhaus, K.; Speck, J.; Großmann, S.; Fritsche, R.: *Untersuchungen zum ladungsträgerbasierten Durchschlagverhalten von Öl-Papier-Isolierungen bei Belastung mit hoher Gleichspannung*. VDE-Fachtagung Hochspannungstechnik, 15.-16.11.2016, Berlin.



Matthias Voigt, Dipl.-Ing.

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

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages Im Rahmen eines Projekts des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) wird ein Bohrsystem entwickelt, welches auf dem Elektro-Impuls-Verfahren (EIV) basiert und mit dem Bohrungen in Hartgestein bis in eine Tiefe von 5000 m durchgeführt werden können. Neben der Entwicklung des Antriebsstrangs, der die benötigte elektrische Energie direkt aus dem Spülungsstrom des Spülmediums im Bohrloch erzeugt, werden Druckversuche bis 500 bar mit verschiedenen Bohrspülungen und Fluiden durchgeführt, um die Gesteinszerstörung und damit die Eignung des EIV für Tiefenbohrungen nachzuweisen (Bild I).

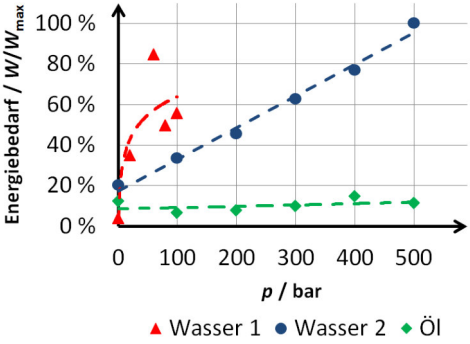


Bild I: Energiebedarf für die Zerstörung von Granit unter Fluiddruck p

Dabei stellte sich heraus, dass der Energiebedarf zur Zerstörung von Granit in wasserbasierten Spülungen mit steigendem Druck zunimmt, wohingegen er in ölbasischen Spülungen auf konstantem Niveau verbleibt.

Aufgrund der unterschiedlichen Permittivitäten von Wasser (ε_r = 80) und Öl (ε_r = 2,5) ergeben sich verschiedene Belastungskapazitäten für den Impulsgenerator. Je größer die Lastkapazität *C* ist, desto geringer ist der Anstieg des sich ergebenden Impulses. Die Anstiegsgeschwindigkeit des Impulses ist wiederum entscheidend dafür, ob der Durchschlag im Gestein oder im Fluid stattfindet (Bild II). Bei gleicher Elektrodenanordnung ist die Durchschlagwahrscheinlichkeit für Granit in Öl unter Druck höher als in Wasser unter Druck und damit der Energiebedarf geringer.

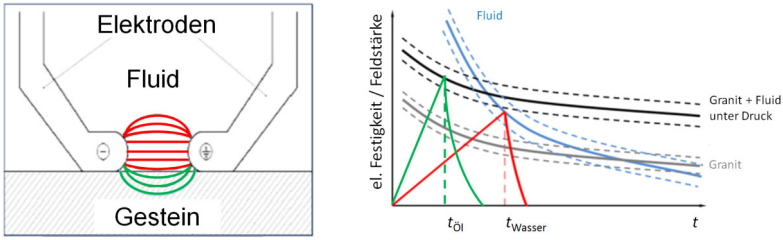
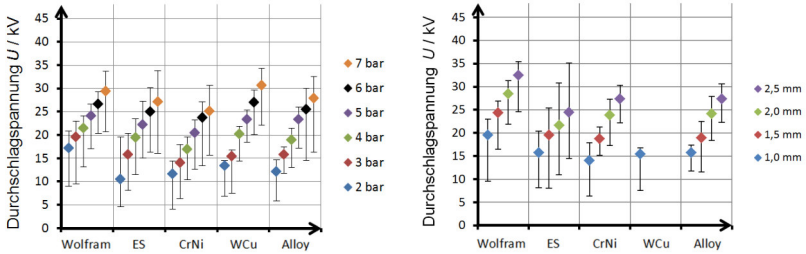


Bild II: Modellvorstellung zur Gesteinszerstörung in Abhängigkeit von Druck und Impulsform

Neben den Untersuchungen zum Durchschlagmechanismus in Gestein und der Entwicklung des Bohrsystems wird das Zündverhalten des Impulsspannungsgenerators erforscht. Um die thermischen Energieverluste möglichst gering zu halten, wurden die Ladewiderstände durch Ladeinduktivitäten ersetzt. Aufgrund des geringen Platzangebots und der einzuhaltenden Isolierabstände sind die Elektrodenabstände zudem sehr klein gehalten. Dies hat jedoch zur Folge, dass es unter Druckgas (Stickstoff) zu Fehlzündungen im Generator kommen kann. Es wurden verschiedene Funkenstreckenmaterialien hinsichtlich der Durchschlagspannung bei schnell ansteigenden Impulsen untersucht (Bild III).



(a) 1,0 mm Elektrodenabstand (b) 3 bar Gasdruck

Bild III: Mittelwerte und Streuungen der Durchschlagspannung

Aus den Daten ist ersichtlich, dass die Streuung bei allen Materialien sehr groß ist. Dies hat zur Folge, dass die korrekte Zündreihenfolge im Impulsspannungsgenerator nicht gewährleistet ist und es zu Fehlzündungen kommen kann. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass Wolfram das beste Verhalten bezüglich Zündverhalten und Streuung aufweist und daher im Impulsspannungsgenerator eingesetzt wird, um einen kontinuierlichen Betrieb zu gewährleisten.

Die ermittelten Daten werden zudem in einem Netzwerkmodell zur Modellierung des Verhaltens eines mehrstufigen Impulsspannungsgenerators verwendet.

Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Strombelastbarkeit und Erwärmung“



Maher Bakka, M.Eng.

Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit des ultrahochfesten Betons als Material für Kompaktbetonmasten von Hochspannungsfreileitungen

Im Bereich der Hochspannung Freileitungsmaste existieren bisher international nur wenige erste Freileitungen mit Masten aus herkömmlichen Beton. Um zukünftig Elektroenergie über große Entfernungen über Trassen mit geringen Flächenbedarf transportieren zu können, sind neue Hochspannungsfreileitung in kompakter Bauweise notwendig. Um dieses Ziel zu erfüllen, sollen die Kompaktmaste aus ultra-hochfestem Beton (UHPC) hergestellt werden. Dafür ist eine neue Sorte von UHPC mit hoher Festigkeitsklasse zu entwickeln.

Die elektrischen und thermischen Eigenschaften des neuen Betonmaterials waren zunächst unbekannt. In der Betonstahlbewehrung und den Spannstählen können durch das magnetische Wechselfeld der Leiteranordnung des Betonmastes Ströme induziert werden. Blitz- und Kurzschlussströme können unter bestimmten Betriebsbedingungen oder Fehlerereignissen durch die Bewehrung fließen. Fließt ein Strom I durch einen elektrischen Widerstand $R(\vartheta)$ so entstehen Verlustleistungen P in Form von Wärme. Abhängig davon wie die im Mast erzeugte Wärme an die Umgebung abgegeben werden kann, erwärmen sich die Stahlbauteile und der Beton. Aus der Erwärmung folgt eine thermische Beanspruchung der Stahlbauteile und des Betons. Um die Erwärmung der Betonmasten berechnen zu können muss zunächst die Stoffeigenschaft der Wärmeleitfähigkeit λ des UHPC's bestimmt werden. Um Die Wärmeleitfähigkeit des UHPC zu ermitteln, wurde ein Versuchsaufbau mit entsprechenden Probekörper gebaut (Bild I).

Zum Messen der Temperaturen wurden vor dem Vergießen in jedem Bronzestab zwei NiCr-Ni Thermoelemente (A0 und A9) montiert. Entlang des Umfanges der Stahlzylinder befanden sich jeweils acht NiCr-Ni Thermoelemente (A1 bis A8) (Bild I). Die Temperaturen wurden durch die Messgräte ALMEMO 5690-2 registriert. Der Belastungsstrom wurde durch einen Stromwandler übersetzt und durch das Leistungsmessgerät LMG95 gemessen. Mit Hilfe des Messprogramm IEEH-Messlab wurden die gemessenen Ströme und Temperaturen auf einem Mess-PC gespeichert. Aufgrund der Wärmekapazität der Versuchsanordnung erwärmen sich die Probekörper nur langsam. Um den thermisch stationären Zustand zu erreichen muss 10 Stunden gewartet werden (Bild II).

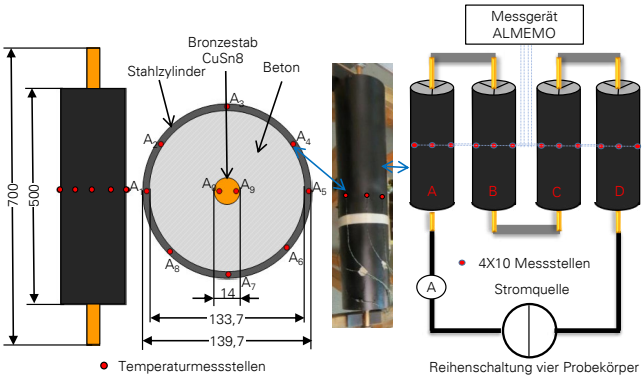


Bild I: Skizze des Probekörpers zum Messen von λ und der Versuchsstand

Die Wärmeleitfähigkeit wurde bei drei verschiedenen Temperaturstufen (70 °C bis 90 °C) ermittelt. Vor Beginn des Versuches wurden die benötigten Belastungsströme für die unterschiedlichen Temperaturstufen durch ein Wärmenetz (OrCad Capture) berechnet. Für jede Temperaturstufe wurde die Wärmeleitfähigkeit dreimal gemessen. Um die Wärmeleitfähigkeit abhängig vom Wassergehalt des Betons zu ermitteln, wurde zu verschiedenen Zeitpunkten gemessen. Die erste Messreihe wurden 100 und die zweite Messreihe 180 Tage nach dem Herstellen der Probekörper durchgeführt (Tabelle I).

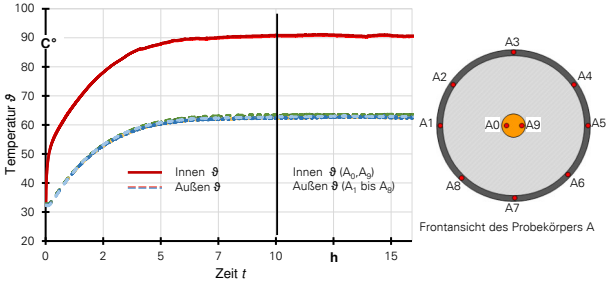


Bild II: Innen- und Außentemperaturverlauf des Probekörpers A bei 90 °C

Tabelle I: Wärmeleitfähigkeit abhängig von Zeit bei verschiedenen Temperaturstufen

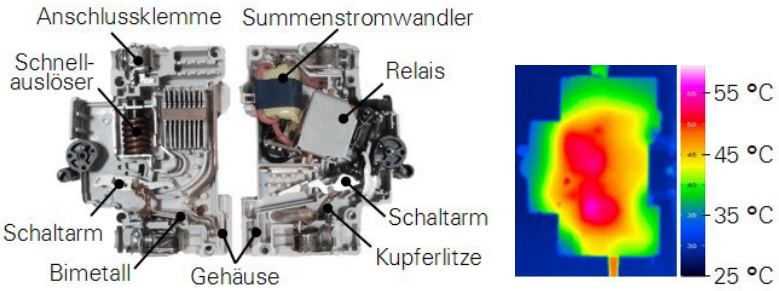
ϑ in °C	70		80		90	
Tage nach dem Betonieren in d	100	180	100	180	100	180
P' in W m^{-1}	98,3	98,9	120,8	122,1	146,3	147
λ in W m^{-1} K^{-1}	2,02	1,97	2,04	1,99	2,02	1,99



Julian Heger, Dipl.-Ing.

Untersuchungen zur Erwärmung von Fehlerstrom-Schutzschaltern mit Überstromauslösern

Fehlerstrom-Schutzschalter mit Überstromauslöser (RCBO) schützen Personen sowie Geräte vor gefährlichen Fehlerströmen und bewahren die angeschlossenen Leitungen vor Überströmen. Üblicherweise werden mehrere RCBOs mit weiteren Betriebsmitteln in einer Energieverteileranlage eingebaut. Um den sicheren Betrieb und die Funktionen zu gewährleisten, darf der RCBO festgelegte Grenztemperaturen nicht überschreiten (Bild I) [1]. Der experimentelle Nachweis, dass die Grenztemperaturen nicht überschritten werden, ist aufwendig. Die Erwärmung kann stattdessen mit thermischen Modellen berechnet werden.



(a) Aufbau eines RCBOs (b) IR-Aufnahme

Bild I: Fehlerstrom-Schutzschalter mit Überstromauslöser

Um die stationäre Erwärmung eines frei aufgestellten RCBOs (I_r = 20 A, I_Δ = 30 mA, 1P+N) zu berechnen, wird eine Bilanz aus den zugeführten und den abgeführten Wärmeleistungen aufgestellt (Gl. 1).

$$P_{zu} = P_{ab} \tag{1}$$

Durch die Verlustleistungen der stromdurchflossenen Leiter, der Schaltkontakte und der ruhenden Verbindungen wird Wärmeleistung zugeführt. Der dominante Anteil der Stromwärmeverluste entsteht dabei im Bimetall, der Spule und den Kupferlitzen. Die Stromwärmeverluste der Schaltkontakte sind bei den untersuchten, fabrikneuen RCBOs im thermisch stationären Zustand vergleichsweise ge-

ring. Die Stromwärmeverluste in den ruhenden Verbindungen, z. B. Schweißverbindungen, sind vernachlässigbar.

Vom Bimetall, der Spule und den Schaltarmen wird die Wärmeleistung über die Luft im Inneren des RCBOs konvektiv auf die Innenseiten des Gehäuses übertragen. Von der Luft im Inneren wird ein geringer Teil der Wärmeleistung über einen Kühlmittelstrom an die Umgebung abgeführt. Das Bimetall gibt zusätzlich durch Wärmestrahlung Leistung ab. Wärmeleitung findet entlang der Strombahnen in die angeschlossen Zuleitungen, sowie von der Spule und dem Bimetall auf das Gehäuse statt. Von der Innenseite wird die Wärmeleistung durch das Gehäuse geleitet und der Gehäuseoberfläche durch Konvektion und Strahlung an die Umgebung abgeführt.

Die aufgestellte Leistungsbilanz, z. B. mit der Wärmenetzmethode, berechnet werden. Das Ergebnis ist eine Temperaturverteilung (Bild II).

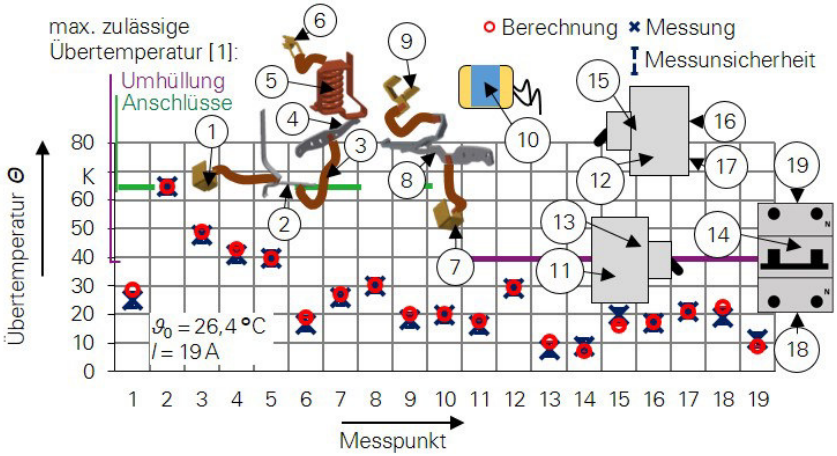


Bild II: Am RCBO gemessene und mit der Wärmenetzmethode berechnete Temperaturverteilung

Die mit dem verifizierten Wärmenetz berechneten Temperaturen stimmen sehr gut mit den gemessenen Temperaturen überein. Die berechneten Temperaturen der Anschlüsse (Messpunkte 1, 6, 7, 9) und auf dem Gehäuse (Messpunkte 11 bis 19) überschreiten die zulässigen Grenztemperaturen nicht. Außerdem zeigt die Berechnung, dass die höchste Temperatur am Bimetall auftritt. Um die Temperaturverteilung des in einen Energieverteiler eingebauten RCBOs zu berechnen, kann das verifizierte Wärmenetz nun mit den Wärmenetzen weiterer Betriebsmittel zusammengeschaltet werden.

[1] DIN EN 61009-1 VDE 0664-20 T1 (Ausg. 2016-10): *Fehlerstrom-/Differenzstrom-Schutzschalter mit eingebautem Überstromschutz (RCBOs) für Hausinstallationen und für ähnliche Anwendungen.*

3.2.2 Publikationen

Poster

Götz, T.; Hering, M.:
Untersuchungen zum kapazitiv-resistiven Übergang in gasisolierten Gleichspannungssystemen unter Anwesenheit einer festen Störstelle auf dem Isolator. Quo Vadis Hochspannungstechnik?.
Merseburg, 22.09.2016

Schlegel, S.; Pfeifer, S.; Oberst, M., et al.:
Wirkung von Oxiden auf das Verhalten von stromführenden Verbindungen mit galvanisch versilberten Leitern aus Kupfer und Aluminium - Ein Vergleich.
Kupfersymposium
Karlsruhe, 16.11.-17.11.2016

Vorträge

Hildmann, C.:
Kontakt- und Langzeitverhalten von Armaturen für Hochtemperatur-Freileitungsseile. Institutskolloquium des IEEH,
TU Dresden, 14.06.2016

Voigt, M.;Anders, E.:
Electric Impulse Technology – long run drilling in hard rocks. IGC 2016,
Offenburg, 24.02.2016

Voigt, M.; Lehr, J.; Anders, E.:
Advanced Evaluation and Research of Electric Impulse Technology – from laboratory to practice – drilling under borehole like conditions. Celle Drilling,
Celle, 12.09.2016

Schlegel, S., Pfeifer, S.:
Untersuchung an zugfesten Pressverbindern. Symposium Fahrstromanlagen,
Wien, Österreich, 24.11.-25.11.2016

Schlegel, S.:
Zuverlässigkeit ruhender stromtragender Verbindungen. Expertenforum R. STAHL,
Lagenburg, 08.06-10.06.2016

Veröffentlichungen

Bäuml, K.; Großmann, S.:
Investigations on different joining techniques regarding electrical joints with normal conducting material and YBCO coated conductors. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol 26, Issue 3,
April 2016

Diedrich, M.; Pampel, H.-P.:
Arbeiten unter Spannung im wiedervereinigten Deutschland – Rückblick, Bestandsaufnahme, Ausblick. ETG-Fachbericht 149: Arbeiten unter Spannung (AuS), S. 9-14, Berlin-Offenbach,
VDE-Verlag, 2016

Fuhrmann, T.; Schlegel, S.; Großmann, S.; Hoidis, M.:
Studies on current-carrying connections with flat surfaces - relationship between mechanical stress and electrical contact behavior. 28th International Conference on Electrical Contacts,
Edinburgh, Großbritannien, 2016

Dreier, S., Lücke, N., Großmann, S.:
The Impact of Films on the Long-Term Behavior of Stationary Electrical Connections and Contacts in Electric Power Systems. 28th International Conference on Electrical Contacts, p. 403,
Edinburgh, Großbritannien, 2016.

Gabler, T.; Backhaus, K.; Speck, J.; Großmann, S.; Fritsche, R.:
Untersuchungen zum ladungsträgerbasierten Durchschlagsverhalten von Öl-Papier-Isolierungen bei Belastung mit hoher Gleichspannung.
VDE-Fachtagung Hochspannungstechnik,
Berlin, 2016

Gatzsche, M.; Lücke, N.; Großmann, S.; Kufner, T.; Freudiger G.:
Evaluation of Electric-Thermal Performance of High-Power Contact Systems With the Voltage-Temperature Relation.
IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2016

Hering, M.:
Überschlagsverhalten von Gas-Feststoff-Isoliersystemen unter Gleichspannungsbelastung. Dissertation,
Technische Universität Dresden, 2016

Hering, M.; Gabler, T.; Speck, J.; Großmann, S.; Riechert, U.:
Einfluss der Gleichspannungsbelastung auf das Überschlagsverhalten störstellenbehafteter Isolatoren für gasisolierte Systeme bei Überlagerung mit Blitzimpulsspannung. VDE-Fachtagung Hochspannungstechnik, Berlin, 2016

Hering, M.; Götz, T.; Speck, J.; Großmann, S.; Riechert, U.:
Influence of space charges on the field transition in gas insulated DC systems. 1st International Conference on Dielectrics, Montpellier, Frankreich, 2016

Hering, M.; Großmann, S.:
Komponenten zu Systemen verbinden – Aktuelle Herausforderungen. 14. Symposium Energieinnovation, Graz, Österreich, 2016

Kemsies, R. H., Milkereit, B.; Kessler, O.; Fuhrmann, T.; Schlegel, S., et al.:
Effect of Dispersoids on long-term stable electrical connections. 15th International Conference on Aluminum Alloys, Chongqing, China, 2016

Pampel, H.-P.:
Zunehmender Einsatz von Gleichspannungssystemen – neue Herausforderungen für das Arbeiten unter Spannung?. ETG-Fachbericht 149: Arbeiten unter Spannung (AuS), S. 45-50, Berlin-Offenbach, VDE-Verlag, 2016

Schlegel, S.; Pfeifer, S.; Oberst, M., et al.:
Wirkung von Oxiden auf das Verhalten von stromführenden Verbindungen mit galvanisch versilberten Leitern aus Kupfer und Aluminium - Ein Vergleich. METALL Fachzeitschrift für Metallurgie; 70. Jahrgang, GDMB Verlag GmbH, in press

Voigt, M.; Anders, E.; Lehmann, F.:
Electric Impulse Technology: Less Energy, Less Drilling Time, Less Round Trips. SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhition, Perth, Australien, 2016

3.3 Preise und Auszeichnungen

„Enno-Heidebroek-Urkunde“ 2015

Die TU Dresden vergibt in jedem Jahr an die besten Absolventen der Ingenieurwissenschaften die Enno-Heidebroek-Urkunde. Am 11.12.2015 wurde Herr Dipl.-Ing. Maximilian Schmidt im feierlichen Rahmen als bester Absolvent in der Vertiefungsrichtung Elektrotechnik ausgezeichnet. Wir gratulieren recht herzlich.



Enno Heidebroek Urkunde
Foto: Dörte Gerlach

„IEEE Best Diploma Thesis Award“ 2016

Mit dem IEEE Werner-von-Siemens Best Diploma Thesis Award zeichnet das Germany Chapter der IEEE Power and Energy Society (PES) jährlich die beste Abschlussarbeit in der Vertiefungsrichtung Energietechnik aus. Master- oder Diplomarbeiten, die mit der Note „sehr gut“ bewertet wurden und auf einem innovativen Gebiet neue Erkenntnisse hervorgebracht haben, können mit dem von der Siemens AG gestifteten Preis geehrt werden. Zusätzlich müssen die Kandidaten deutlich überdurchschnittliche Studienleistungen erbracht haben und durch ihren Werdegang überzeugen. Am 27.09.2016 wurde im Rahmen des IEEE PES Workshops „Verteilnetze für die Energiewende“ in Kaiserslautern, Herr Dipl.-Ing. Maximilian Schmidt für die Diplomarbeit „Untersuchungen zur Frequenz- und Spannungsregelung modularer Netze mit hohem Anteil erneuerbarer Energieanlagen“ mit dem IEEE Best Diploma Thesis Award 2016 ausgezeichnet. Wir gratulieren recht herzlich.



Best Diploma Award
Foto: Marco Weisenstein

VDE/ETG-Literaturpreis 2016

Mit dem VDE/ETG-Literaturpreis werden jährlich hervorragende Veröffentlichungen auf dem Gebiet der elektrischen Energietechnik ausgezeichnet. Der Preis ist eine Anerkennung für eine besondere wissenschaftliche und publizistische Leistung.
Auf der 14. CIGRE/CIRED-Informationsveranstaltung in Wiesbaden wurde am 24. Oktober 2016 Frau Dr.-Ing. Maria Hering mit dem VDE/ETG-Literaturpreis 2016 ausgezeichnet.
ETG-Vorstand, Herr Prof. Dr.-Ing. Albert Moser, überreichte den Preis für die Veröffentlichung „Capacitive-resistive transition in gas insulated DC systems under the influence of particles on the insulator surface". Wir gratulieren recht herzlich.



Übergabe des VDE/ETG-Literaturpreises
Foto: Dr.-Ing. Thomas Benz

3.4 Promotionen



Karsten Backhaus, Dr.-Ing.

Das dielektrische Verhalten der Öl-Papier-Isolierung bei hoher Gleichspannung

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann Technische Universität Dresden
Prof. Dr.-Ing. Andreas Küchler FH Würzburg-Schweinfurt

Basierend auf den physikalischen Eigenschaften der unterschiedlichen ölintrinsischen und injizierten Ladungsträger wird ein neues Leitfähigkeitsmodell für Isolieröl und -papier für die Belastung mit hoher Gleichspannung aufgestellt. Das Modell wird mit der Wahl geeigneter Randbedingungen für das elektrische Feld und der Teilchenströme auf die Poisson-Nernst-Planck-Gleichung übertragen. Es steht damit ein Werkzeug zur Verfügung, das dielektrische Verhalten der Öl-Papier-Isolierung zu modellieren, dessen Parameter auf den physikalischen Ladungsträgereigenschaften wie Mobilität und Diffusion basieren. Mit dessen Hilfe werden sowohl die nichtlineare Leitfähigkeit als auch das Durchschlagverhalten als deren Extrapolation feldstärkeabhängig erklärt.

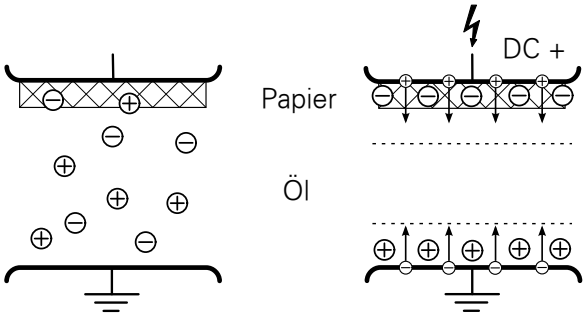


Bild I: Physikalisches Leitfähigkeitsmodell der Öl-Papier-Isolierung

Die Arbeit beschäftigt sich punktuell mit dem dielektrischen Verhalten der Öl-Papier-Isolierung bei Belastung mit hoher Gleichspannung. Soll das Isoliersystem durch ein höheres Spannungsniveau oder kompaktere Bauweise des Transformatorenkessels höher belastet werden, bedarf es einer genauen Kenntnis der dielektrischen Vorgänge und der Identifizierung hoher Beanspruchungen.



Sebastian Dreier-Schmidt, Dr.-Ing.

The Impact of Films on the Long-Term Behavior of Stationary Electrical Connections and Contacts in Electric Power Systems

Projekt gefördert durch:

sdw
Stiftung der Deutschen Wirtschaft
Wir fördern den Nachwuchs!

Stiftung der Deutschen Wirtschaft

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann Technische Universität Dresden
Prof. Dr. Noureddine Ben Jemaa Université de Rennes 1

Verbindungen und Kontakte der elektrischen Energietechnik müssen über ihre gesamte Lebensdauer hinweg zuverlässig funktionieren. Durch den Einfluss verschiedener Alterungsmechanismen (Bild I) wird der Verbindungs- und Kontaktwiderstand größer. Ein Alterungsmechanismus ist das zeit- und temperaturabhängige Wachstum von Fremdschichten infolge chemischer Reaktionen (Oxidation). Derartige Fremdschichten können auf der Oberfläche von Werkstoffen der elektrischen Energietechnik (Kupfer, Aluminium, Beschichtungen) wachsen. Es wurden Langzeitversuche gekreuzter Zylinder mit konstanter Kontaktkraft aufgebaut und der Kontaktwiderstand abhängig von der Zeit gemessen. Andere Alterungsmechanismen wurden durch geeignete Maßnahmen im Versuchsaufbau unterdrückt. Der Fremdschichteinfluss unmittelbar nach dem Reinigen der Kontaktoberflächen wurde in einer Inertgasumgebung messtechnisch bestimmt. Der gemessene Kontaktwiderstand gekreuzter Aluminiumzylinder in Inertgas ist ca. 40 % kleiner als in Luft.

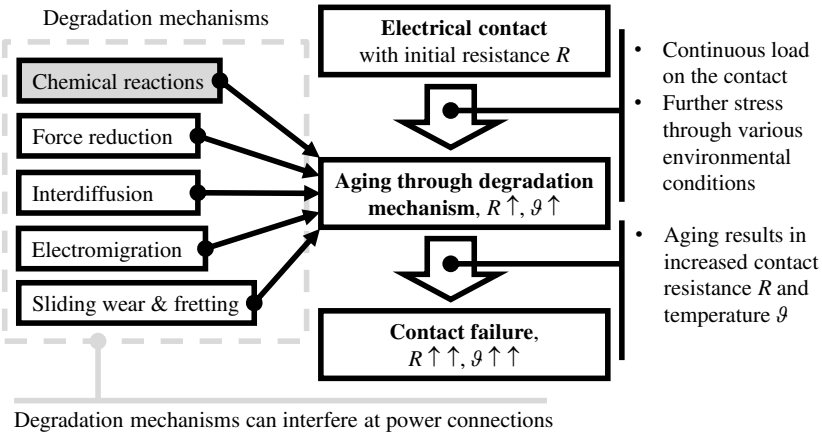


Bild I: Überblick der Alterungsmechanismen und deren Interaktion

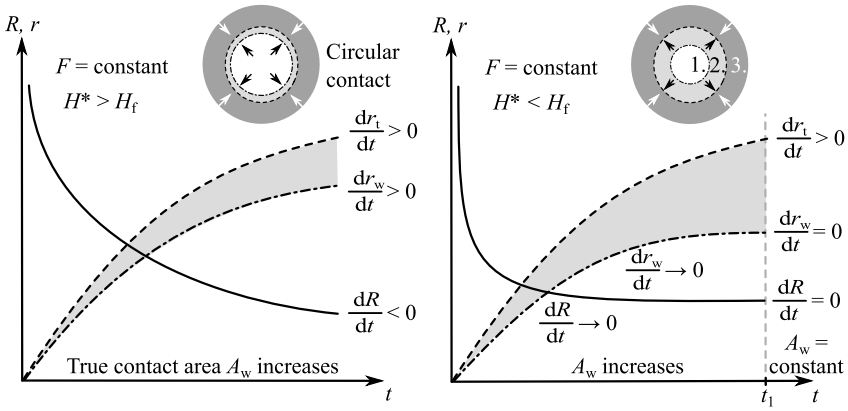


Bild II: Langzeitverhalten des Kontaktwiderstand R abhängig von der Zeit t und dem radialen Fremdschichtwachstum (Punktkontakt, F=konst.); H^* Werkstoffhärte, H_f Fremdschichthärte, r_t Radius mechanisch verformte Fläche, r_w Radius stromstragende Fläche, A_w stromtragende Fläche, t_1 Zeit wenn $dR/dt=0$, weiße Pfeile: Richtung des radialen Fremdschichtwachstums, schwarze Pfeile: Richtung der temperatur- und materialabhängigen Fließprozesse, 1. Stromtragende Fläche, 2. Übergangsbereich, 3. Intakte Fremdschicht (isolierend)

Die Ergebnisse der Langzeitversuche sind schematisch in Bild II dargestellt. Abhängig von Temperatur und Werkstoff sind Fließprozesse und Fremdschichtwachstum gleichzeitig wirksam. Ist die Härte des Werkstoffs H^* größer als die Härte der Fremdschicht H_f, so kann die Fremdschicht durchbrochen bzw. weggedrückt werden (A). Infolgedessen nimmt die den elektrischen Strom führende Fläche zu und der Kontaktwiderstand wird kleiner ($dR/dt<0$). Dieser Prozess setzt sich fort, solange die Temperatur und die mechanische Beanspruchung ausreichend groß sind (F=konst.). Ist die Härte der Fremdschicht H_f hingegen größer als die Werkstoffhärte H^*, so kommt es nach Abschluss der Formierungsphase t_1 zu keiner weiteren Vergrößerung der stromtragenden Kontaktfläche und somit zu $dR/dt=0$. Bei den hier durchgeführten Untersuchungen mit Punktkontakten führt die Fremdschichtbildung infolge chemischer Reaktionen wie Oxidation nicht zu einer signifikanten Zunahme des Kontaktwiderstands abhängig von der Zeit. Andere Alterungsmechanismen müssen wirksam werden um zu einer signifikanten Alterung der Kontakte zu führen.

Die digitale Fassung dieser Arbeit ist über den Publikationsserver Qucoas frei zugänglich und kann unter dem nachfolgenden Link abgerufen werden:
`http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-197959`

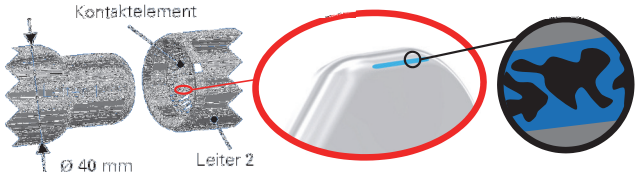


Michael Gatzsche, Dr.-Ing.

Elektrisch-thermisches Betriebs- und Langzeitverhalten hochstromtragfähiger Kontaktelemente

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann Technische Universität Dresden
Prof. Dr.-Ing. Jian Song Hochschule Ostwestfalen-Lippe

In Geräten und Anlagen des Stromnetzes werden Steckverbinder mit hoher Stromtragfähigkeit eingesetzt, wenn bewegliche Teile kontaktiert werden oder Betriebsmittel mit geringem Aufwand montier- und demontierbar sein müssen. Die elektrische Verbindung der Leiter wird dabei oft mit federnden Kontaktelementen realisiert (Bild I). Die Kontaktelemente müssen als Teil der Strombahn während der Lebensdauer des Geräts den Betriebsstrom im Kiloampere-Bereich und im Fehlerfall bis zu einige Sekunden lang den eine Größenordnung höheren Kurzschlussstrom tragen. In der Dissertation wurden Rechenmodelle für die innere Erwärmung von Hochstrom-Kontaktsystemen im stationären Dauerbetrieb und im transienten Kurzschlussfall entwickelt. Das elektrische und mechanische Langzeitverhalten im Temperaturbereich (105 . . . 180) °C wurde experimentell mit stromdurchflossenen, fettgeschmierten Modellsteckverbindern, die regelmäßig getrennt und neu gesteckt wurden, untersucht. Modellerstellung, Rechnungen und Versuche wurden beispielhaft mit Kontaktelementen vom Typ Multilam durchgeführt. Kontaktelemente und Leiter bestanden aus versilbertem Kupfer.



(a) Steckverbindung mit hochstromtragfähigem Kontaktelement

(b) Detailansicht eines Stegs des Kontaktelements mit Kontaktbereich K1

(c) mögliche Form der wirksamen Kontaktfläche

Bild I

Für das stationäre Betriebsverhalten wurden die mit der analytischen Spannungs-Temperatur-Beziehung nach Kohlrausch berechneten Ergebnisse mit einem Erwärmungsversuch verifiziert. Die Temperaturdifferenz zwischen Kontaktelement und Leiter ist bei Standardanwendungen, wie in Schaltanlagen, mit $\Delta\vartheta = 3\,\mathrm{K}$ sehr

klein. Deshalb ist die Leitertemperatur als Zielgröße beim Dimensionieren der Dauerstrombelastbarkeit ausreichend. Bei Kurzschlussstrombelastung wurde im Kontaktsystem eine schnelle, räumlich unterschiedlich ausgeprägte Erwärmung numerisch berechnet. Leiter und Kontaktelement erwärmen sich kontinuierlich, wobei die mittlere Endübertemperatur im Kontaktelement aufgrund des kleineren stromtragenden Querschnitts eine Größenordnung höher ist. Die Kontakte führen bei 50 Hz-Wechselstrom aufgrund ihrer vernachlässigbaren Wärmekapazität 100 Hz-Temperaturzyklen aus. Dabei können die Maximaltemperaturen noch deutlich größer als die mittlere Temperatur der Kontaktelemente sein (Bild II).

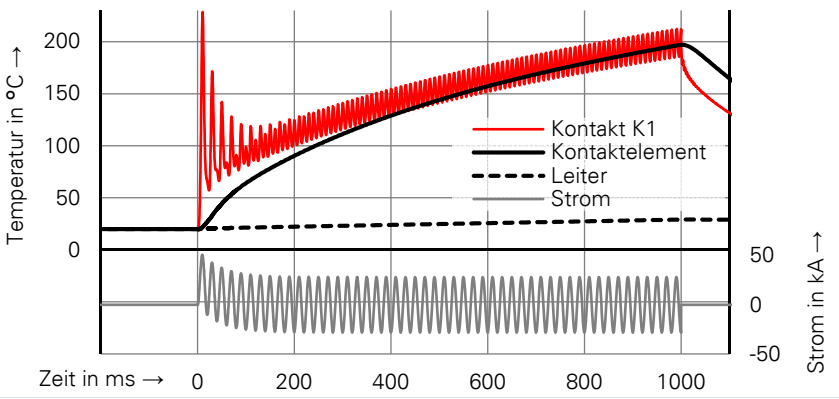


Bild II: Temperaturverläufe in der Steckverbindung bei Belastung mit 50-Hz-Kurzschlussstrom I_k = 20 kA, T_k = 1 s, i_p = 51 kA

Im Langzeitversuch waren nach 16 000 h Betriebszeit bei 180 °C und regelmäßigen simulierten Steckvorgängen die Verbindungskräfte noch genügend groß, um die elektrischen Anforderungen eines neuen Kontaktsystems zu erfüllen. Allerdings führte bei einer Betriebstemperatur von 105 °C ein thermisch instabiles Schmierfett zum vorzeitigen elektrischen Ausfall eines Teils der Steckverbinder (Bild III).

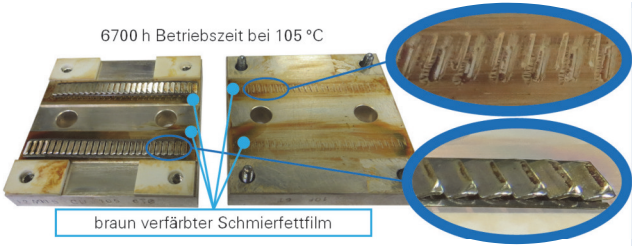


Bild III: aufgrund von thermisch gealtertem Schmierfett elektrisch ausgefallener Modellsteckverbinder



Maria Hering, Dr.-Ing.

Überschlagsverhalten von Gas-Feststoff-Isoliersystemen unter Gleichspannungsbelastung

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann Technische Universität Dresden
Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen Universität Stuttgart

Gasisolierte Systeme im Gleichspannungsbetrieb vereinen für Anwendungen moderner Energieübertragung die Forderungen nach kleinräumigen Anlagen und verlustarmem Energietransport über große Entfernungen. Für einen zuverlässigen und sicheren Betrieb muss das Verhalten der eingesetzten Gas-Feststoff-Isolierung im technologischen System bis an die Grenzen des Isolationsvermögens bekannt sein. Gegenstand der Untersuchungen ist deshalb das Überschlagsverhalten von Gas-Feststoff-Isoliersystemen unter Gleichspannungsbelastung. Dabei stehen zwei wesentliche Einflussfaktoren im Vordergrund: die Temperatur, motiviert durch reale Stromwärmeverluste, und eine feste Störstelle auf der Gas-Feststoff-Grenzfläche, motiviert durch in der Praxis nicht völlig auszuschließende, metallische Partikel. Die Effekte dieser beiden Parameter auf die Feldverteilung, die Oberflächen- und Raumladungsbildung sowie das Isolationsvermögen bei Gleichspannung werden zunächst in zwei Versuchsanordnungen separat experimentell untersucht. Anschließend wird deren Zusammenwirken und gegenseitige Beeinflussung im Gesamtsystem analysiert (Bild I).

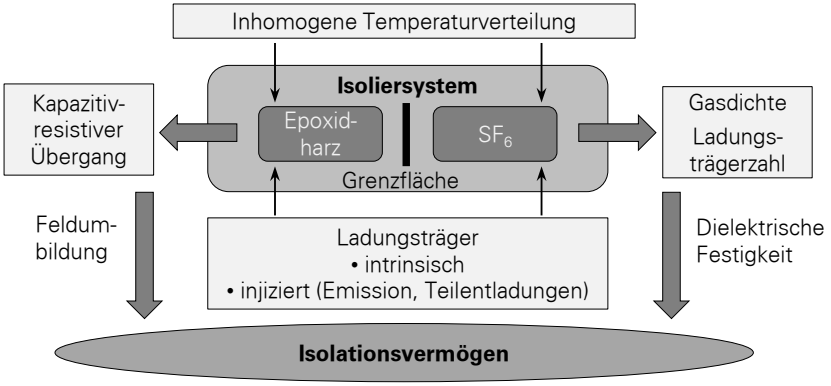


Bild I: Übersicht zu untersuchten Einflussparametern und der Zielstellung

Die betriebsbedingte Erwärmung der Leiter gasisolierter Systeme führt zu einer inhomogenen Temperaturverteilung, die sich auf die Eigenschaften der Isolierstoffe Gas und Epoxidharz auswirkt. Die von der Temperatur abhängige Leitfähigkeit der Feststoffisolatoren führt zu einer temperaturabhängigen Feldverteilung, bei der sich der Ort der Höchstfeldstärke verschiebt. Dabei kann sich der Absolutwert der Höchstfeldstärke erhöhen und somit das Isolationsvermögen verringern. Gleichzeitig weist das Isoliergas nahe des erwärmten Leiters lokal eine geringere Dichte und damit eine geringere dielektrische Festigkeit auf. Die thermisch bedingte Minderung des Isolationsvermögens bei Gleichspannung beträgt in der untersuchten Anordnung (25 . . . 35) %.

In den schwach inhomogenen Feldern gasisolierter Anlagen erweisen sich metallische Partikel auf Isolatoren ab drei Millimetern Länge als besonders kritisch. Bei einem Gasdruck unterhalb von 0,3 MPa setzen an den Partikelspitzen zum Teil bereits ab 50 % der Durchschlagsspannung ohne Partikel Teilentladungen ein, sodass die Koronastabilisierung zu einer vergleichsweise hohen Überschlagsspannung führt. Durch diese stabilen Glimmentladungen kann die Störstelle bei Gleichspannung durch die üblichen Detektionsverfahren jedoch nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden. Oberhalb von 0,3 MPa treten vor dem Überschlag keine Teilentladungen auf. Aufgrund der fehlenden Koronastabilisierung kann die Isolationsfestigkeit durch einen erhöhten Gasdruck nicht oder nur stark unterproportional gesteigert werden. Die mit der Modellanordnung gewonnenen Erkenntnisse sind nachweislich auf Isolatoren kommerzieller Anlagen übertragbar.

Das Überschlagsverhalten von Gas-Feststoff-Isoliersystemen unter Gleichspannungsbelastung wird maßgeblich durch die Temperaturverteilung und durch feste Störstellen auf der Grenzfläche beeinflusst. Oberflächen- und Raumladungen verändern das üblicherweise ohmsch-kapazitiv beschriebene Verhalten des Isolierstoffsystems bei Gleich- und Mischspannungsbelastung. Der Einfluss zusätzlicher Ladungsträger auf die stark temperaturabhängige Feldumbildung demonstriert, dass das Isoliergas in diesem Fall mit teilchendichte- und feldstärkeabhängigen Drift- und Diffusionsprozessen zur Modellierung des transienten Verhaltens von Gleichspannungssystemen berücksichtigt werden muss.

Die Untersuchung des Systemverhaltens an den Grenzen des Isolationsvermögens ist wichtiger Bestandteil bei der Entwicklung innovativer Technologien der modernen Energieübertragung bei steigender Übertragungsleistung.

Die digitale Fassung dieser Arbeit ist über den Publikationsserver Qucoas frei zugänglich und kann unter dem nachfolgenden Link abgerufen werden:
`http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-200879`

4 Kooperationen

4.1 Wissenschaftskooperationen

Aalto University/Finnland

CEN SIPAM-Centro Gestor e Operacional do Sistema de Protecao da Amazonia, Brasilien

DAMASCUS UNIVERSITY

ETH Zürich

fem Forschungsinstitut Edelmetalle + Metallchemie

FGW - Forschungsgesellschaft Wind e.V.

Fraunhofer IWES

Fraunhofer ISE

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Gesellschaft für Technische Thermochemie und -physik mbH

Helmut Schmidt Universität Hamburg

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.

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 Kassel

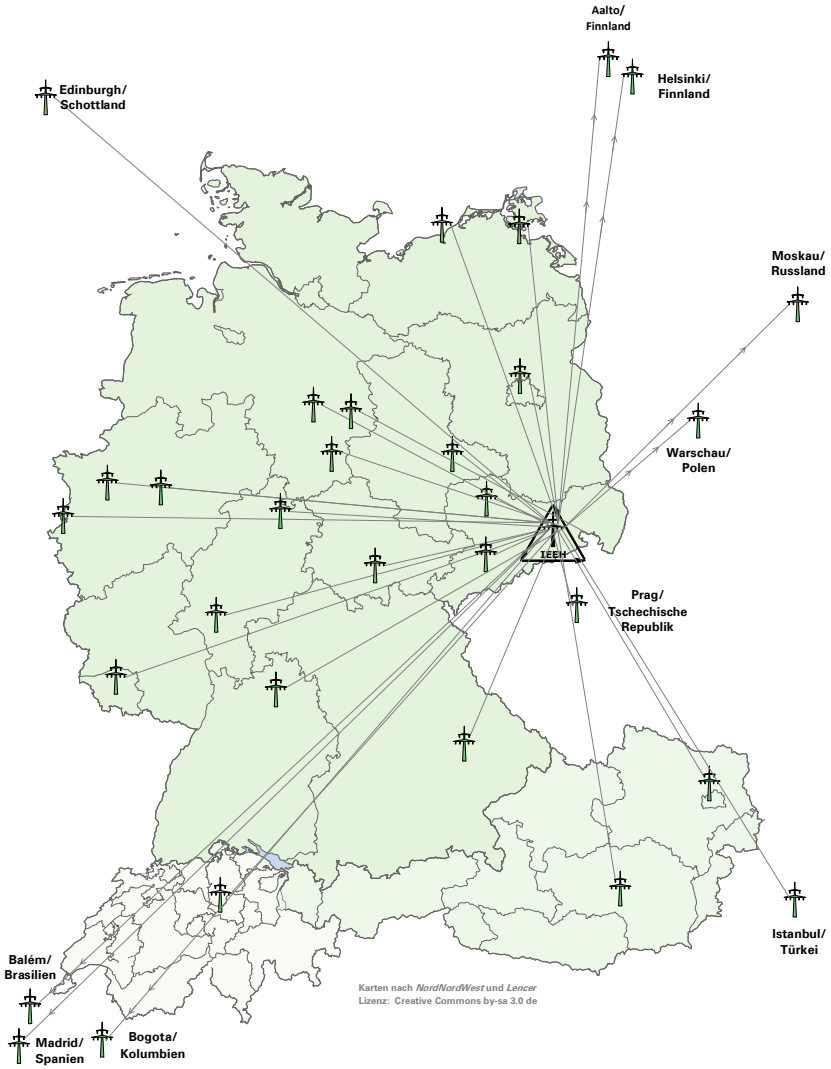
Universität Rostock

Universität Siegen

Universität Stuttgart

Wroclaw University of Technology/Polen

Yildiz Teknik Üniversitesi


Aalto/
Finnland
Helsinki/
Finnland
Edinburgh/
Schottland
Moskau/
Russland
Warschau/
Polen
IEEH
Prag/
Tschechische
Republik
Istanbul/
Türkei
Balém/
Brasilien
Madrid/
Spanien
Bogota/
Kolumbien
Karten nach NordNordWest und Lencer
Lizenz: Creative Commons by-sa 3.0 de

4.2 Industriekooperationen

50Hertz Transmission GmbH
ABB Asea Brown Boveri Ltd
Alcan Singen GmbH und CO. KG
Alexander Binzel Schweisstechnik GmbH & Co. KG
ALSTOM Grid
Amprion GmbH
AREVA Energietechnik GmbH
ASBESCO (INDIA) PVT. LTD.
Avacon AG
A.Eberle GmbH & Co.KG
Betonbau GmbH
Bosch AG
BSD Bildungs- und Servicezentrum GmbH
Cellpack GmbH
Dehn & Söhne GmbH
DNV GL Energy

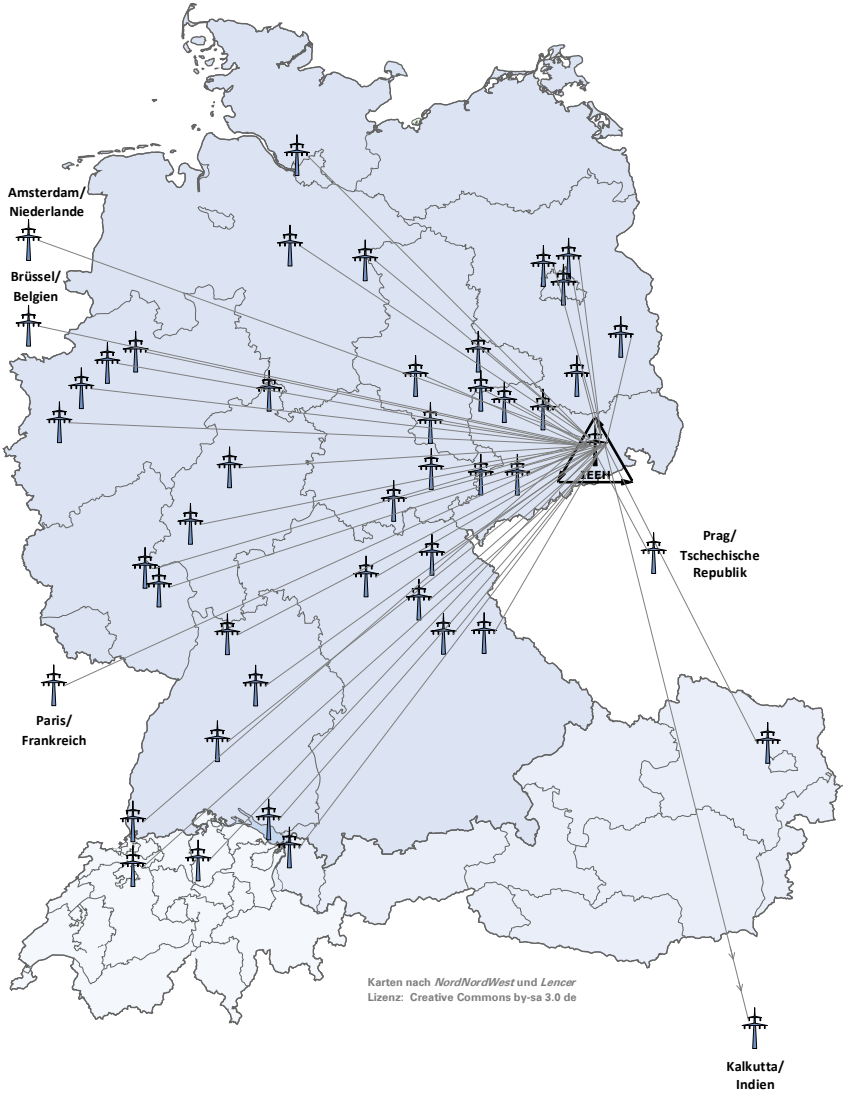
Doble Lemke GmbH
DREWAG Stadtwerke Dresden GmbH
E.ON Avacon
E.ON Bayern AG
E.ON edis AG
ELECTRONICON Kondensatoren GmbH

Elektrokeramik Sonneberg GmbH
EnBW Energie Baden-Würtemberg AG
EnBW Regional AG
ENSO Energie Sachsen Ost AG
ENSO NETZ GmbH
envia Mitteldeutsche Energie AG
ESA Elektroschaltanlagen Grimma GmbH
Europoles GmbH & Co. KG
EWZ - Elektrizitätswerk der Stadt Zürich

FEAG GmbH
Fichtner GmbH & Co. KG
fuseXpert
GAHL Hochleitungsbau

GWT-TUD
Heine Resistors GmbH
HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH
Infrabel AG Belgien
Infraserv Gmbh & Co. Höchst KG
InfraTec GmbH
ivis gmbh
Jean Müller GmbH
Korropol GmbH
Lanz Oensingen AG
LAPP Insulator GmbH
Linde Materialhandling GmbH
LTB Leitungsbau GmbH

LTI Motion GmbH
Maschinenfabrik Reinhausen
MERSEN Deutschland FFM AG
MITNETZ Strom GmbH
Multi-Contact AG
Neldner Consult
Netzdienste Rhein/Main GmbH
Nexans Power Accessories Germany GmbH
NH-HH-Recylingverein
Omicron electronics GmbH
Optocon AG
Österreichische Bundesbahnen-Holding Aktiengesellschaft
PARTZSCH Elektromotoren e. K
Pfiffner Messwandler AG
PPC Insulators GmbH
ProRail N.V.
Ribe-SubCon GmbH
Richard Bergner Elektroarmaturen GmbH & Co. KG
RITZ Instrument Transformers GmbH
Robert Bosch GmbH
RWE AG
R. Stahl AG
SBB - Schweizerische Bundesbahnen
Scheidt GmbH & Co KG
Schneider Electric GmbH
SGB Neumark GmbH
SGS Société Générale de Surveillance Holding (Deutschland) GmbH
Siemens AG
SMA Technologie GmbH
SMT & HYBRID GmbH
Société Nationale des Chemins de fer Français - SNCF Frankreich
Stadtwerke Oranienburg
TEN - Thüringer Energienetze
TenneT TSO GmbH
ThyssenKrupp Aufzüge GmbH
TÜV Süddeutschland Holding AG
Tyco Electronis AG
Vattenfall Europe Distribution GmbH
VEM Sachsenwerk GmbH
Werner Industrielle Elektronik - Werner GmbH


Amsterdam/
Niederlande
Brüssel/
Belgien
EEH
Prag/
Tschechische
Republik
Paris/
Frankreich
Kalkutta/
Indien
Karten nach *NordNordWest* und *Lencer*
Lizenz: Creative Commons by-sa 3.0 de

4.3 Kommissions- und Gremienarbeit

4.3.1 Lehrstuhl Elektroenergieversorgung

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

M.Sc. Ana Maria Blanco
- CIGRE Working Group C6/C4.29 *Power Quality Aspects of Solar Power*

Dr.-Ing. Jörg Dickert
- VDE Dresden Arbeitskreis: *Verteilungsnetze*

Dipl.-Ing. Niels Erdmann
- VDE Task Force *Perspektiven der Übertragungstechnik*

Dipl.-Ing. Sebastian Krahmer
- VDE Dresden Arbeitskreis: *Verteilungsnetze*

Dr.-Ing. Jan Meyer
- VDE Dresden Arbeitskreis: *Netzrückwirkungen*
- DK CIRED und CIRED Session Advisory Group (Session 2)
- German national Committee CIGRÉ C4
- CIRED/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 *Netzrückwirkungen*
- D-A-CH-CZ Arbeitsgruppe *EMV* (Technische Regeln zur Beurteilung von Netzrückwirkungen)
- DKE/UK 767.1 *Niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen* (Gastmitglied)
- CENELEC SC205A WG11 *Mains Communication Systems/Immunity*

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*
- 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*

Dipl.-Ing. Tobias Schnelle
- VDE (ETG) Task Force *Grundsatzstudie Gleichspannungsverteilnetze*

4.3.2 Lehrstuhl Hochspannungs- und Hochstromtechnik

Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann
- Mitglied der Bereichsleitung des Bereiches Ingenieurwissenschaften
- Mitglied im Vorstand des VDE-Bezirksvereins Dresden e. V.
- Mitglied im Arbeitskreis *Hochspannungsgeräte* und *-anlagen* im VDE-BV Dresden
- Mitglied im VDE-ETG-Fachbereich Q3 *Kontaktverhalten und Schalten*
- Gesellschaft von Freunden und Förderer der TU Dresden e. V.
- Vorsitzender des Vereins der Freunde und Förderer der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik e. V.
- CIGRÉ-WG D1.54 - Priciples to measure the AC and DC resistance of conductors
- Kuratorium AIESEC Dresden e. V.
- Kuratorium Fraunhofer IPMS Dresden
- VDE (ETG) Task Force *Perspektiven der Übertragungstechnik*

Dr.-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*
- Mentorin im Schüler-Mentoring-Programm der TU Dresden

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
- CIGRÉ Working Group B2.64 *Inspection and Testing of Equipment and Training for Live-Line Work on Overhead Lines*

Dr.-Ing. Stephan Schlegel
- Arbeitskreis DKE AK 411.3.2 *Verbinder*

5 Veranstaltungen

Studentenexkursionen am 27.1. und am 11.11.2016

Im Rahmen der Vorlesung Elektrosicherheit und Versorgungszuverlässigkeit wird von Doz. Dr. Bauer mit den Studenten des 9. Semesters jedes Jahr eine Exkursion in das 380-/110-kV-Umspannwerk Dresden Süd der 50Hertz Transmission GmbH durchgeführt.
Der erste Teil der Exkursion hat die Messung der elektrischen Feldstärke und der magnetischen Flussdichte zum Inhalt. Damit erhalten die Studenten die Möglichkeit zum Abschnitt Schutz und Vorsorge entsprechend der BGV B11 und der 26. BImSchV ergänzend zur Berechnung der Feldgrößen auch die Messtechnik zu deren Messung kennenzulernen.
Im zweiten Teil der Exkursion werden bei einem Rundgang durch die Anlage zu den Themen Sicherheit, Schutz, Redundanz und Wirtschaftlichkeit Beispiele zur Primärtechnik sowie zur Schutz- und Leittechnik erläutert. Die Exkursion fand am 27.1.2016 für den Studienjahrgang 2011 und am 11.11.2016 für den Studienjahrgang 2012 statt.



Messung der magnetischen Flussdichte



Erläuterungen zur Primärtechnik



Diskussion zur Schutz- und Leittechnik

„Dresdner Kreis 2016“ am 23. und 24.03.2016

Der Dresdner Kreis bietet jungen, wissenschaftlichen Mitarbeitern der Universitäten Magdeburg, Hannover, Dresden und Duisburg-Essen die Möglichkeit im Rahmen eines wissenschaftlichen Kolloquium ihre aktuellen Forschungsthemen zu präsentieren und im Anschluss zu diskutieren.
Das 17. Treffen zum Dresdner Kreis fand in diesem Jahr am 23. und 24.03.2016 an der TU Dresden statt. Nach der Begrüßung durch Herrn Professor Schegner wurden am ersten Tag in zwei Vortragsreihen insgesamt sieben aktuelle Forschungsthemen vorgestellt. Zusätzlich präsentierte Herr Professor Oswald den aktuellen Stand zur Normung der Kurzschluss-Strom-Berechnung.
Zum Abschluss des ersten Tages folgte am Abend ein gemeinsames Abendessen im Feldschlößchen-Stammhaus, wo die Teilnehmer, neben dem gemeinsamen Austausch, die Möglichkeit hatten, sich im Biermuseum während einer Museumführung über das traditionelle, sächsische Brauereiwesen zu informieren.
Am zweiten Tag erfolgten zwei Werksbesichtigungen. Bei der HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH bekamen die Teilnehmer einen Einblick in die Fertigung und Prüfung von Systemen der Hochspannungsprüf- und Messtechnik. Anschließend wurden die einzelnen Fertigungsprozesse für den Bau von Leistungstransformatoren im Rahmen einer Werksführung im Siemens-Transformatorenwerk Dresden präsentiert.
Den Abschluss zum Dresdner Kreis 2016 bildete die Besichtigung der Semperoper am Nachmittag des zweiten Tages.



Gruppenfoto in der Hochspannungshalle der TU Dresden

BDEW Kongress vom 07.-09.06.2016

Im Juni fand der diesjährige Kongress des Bundesverbands der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) in Berlin statt. Unter dem Motto „Change" gab es ein umfangreiches Angebot an Vorträgen und Diskussionen zu aktuellen Themen der Branche.
Dieses Jahr wurde der Kongress erstmalig mit einem neuen Konzept in der „Station Berlin", einem ehemaligen Bahnhof, veranstaltet. Für die Vorträge der prominenten Redner aus Politik und Wirtschaft versammelten sich die Teilnehmer im früheren Bereich der Bahnsteige. Als Hauptredner sprachen die Bundeskanzlerin, Angela Merkel, und der Bundesminister für Wirtschaft und Energie, Sigmar Gabriel.

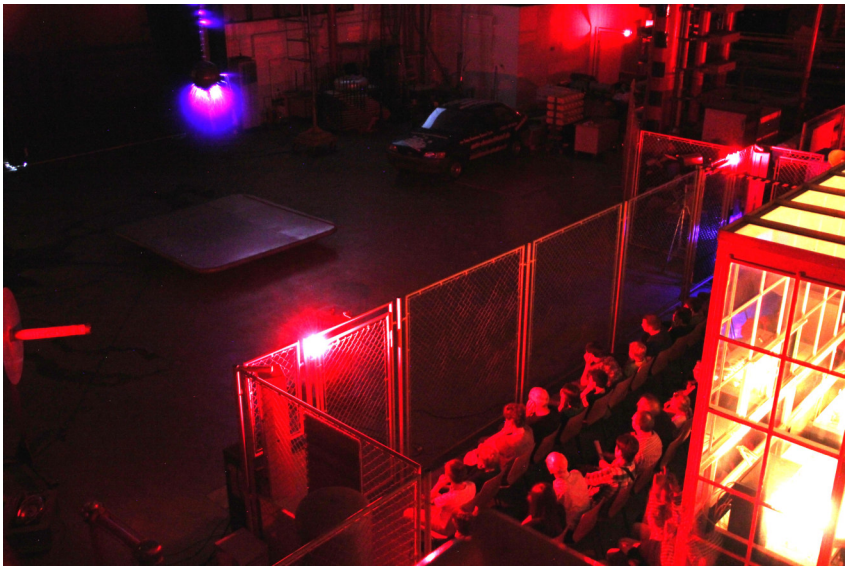


Teilnehmer der Nachwuchsinitiative

Die Nachwuchsinitiative des Bundesverbandes ermöglichte auch in diesem Jahr 100 Studierenden und Berufseinsteigern die Teilnahme am Kongress. Stellvertretend für das IEEH nahm Marcella Oberst daran teil. Für die Studenten gab es zusätzlich am Tag vor Kongressbeginn eine Führung durch das Schaltwerk der Firma Siemens, wo neben den Produktionsstätten auch das Hochspannungsprüffeld besichtigt wurde.
Die Kongresstage selbst waren neben den Themenrunden von vielen interessanten Gesprächen mit anderen Teilnehmern und den Vertretern der Unternehmen geprägt. Neben Firmen wie ABB, GE oder Siemens konnten auch Einblicke in die verschiedensten Start-ups gewonnen werden.

14. Dresdner Lange Nacht der Wissenschaften 2016

Am Freitag, den 10. Juni 2016 wurden wie in jedem Jahr die Türen von Laboren der Hochschulen und Forschungseinrichtungen in Dresden für 35.000 Wissensdurstige geöffnet. Das diesjährige Motto lautete: „Staunend durch die Nacht". Diesem Motto sind Besucher jeden Alters aus Dresden, aber auch weiterentfernte Gäste gefolgt. In diesem Jahr konnte der Lehrstuhl für Hochspannungs- und Hochstromtechnik wieder den beliebten und hochspannenden Experimentalvortrag unter dem Titel „Faszination Elektrizität – Experimentalvortrag zu hochspannungstechnischen Phänomenen und technischen Lösungen" anbieten. Es wurden Entladungsphänomene gezeigt, die mit fast allen Sinnen wahrgenommen werden konnten und Blitze von mehreren Metern Länge erzeugt. Aktuelle Forschungsthemen und technische Lösungen auf dem Gebiet der Elektroenergietechnik wurden bei dieser Gelegenheit ebenfalls präsentiert.
Unser Team bedankt sich bei allen Gästen für das rege Interesse, die Geduld in der Warteschlange und das Verständnis für die maximal zugelassene Anzahl an Personen zu den stets ausgebuchten Veranstaltungen. In Vorfreude auf die nächsten Vorführungen in der Hochspannungshalle sei auf die nächste Lange Nacht der Wissenschaften am 16. Juni 2017 verwiesen.



Experimentalvortrag in der Hochspannungshalle – Durchschlagverhalten Kugel- gegen Plattenelektrode

Exkursion zum Trainings- und Schulungszentrum für HS-Freileitungsbau der Firma Omexom in Korbußen am 11.07.2016

Den inzwischen traditionellen Abschluss der Vorlesungsreihe „Ausgewählte Kapitel der elektrischen Energietechnik“ bildet die Exkursion in das Trainings- und Schulungszentrum für Hochspannungs-Freileitungsbau der Firma Omexom Hochspannung GmbH nach Korbußen (Thüringen). Sie wurde erneut von Herrn Dr.-Ing. habil. K. Papailiou organisiert und begleitet, der als Gastdozent der Vorlesungsreihe die Aspekte des Planens und Berechnens von Freileitungen vermittelt. Nach der Ankunft und der herzlichen Begrüßung durch das Team des Schulungszentrums wurden das Unternehmen sowie das Trainings- und Schulungszentrum vorgestellt. Das Üben der verschiedenen Arbeitsabläufe, wie etwa das Montieren von Doppel-Trag- und Abspannketten sowie einer Spiralarmatur oder das Herstellen einer Pressverbindung gab praxisnahe Einblicke in den Freileitungsbau. Besonders herausfordernd war in diesem Jahr das Besteigen des Freileitungsmastes mithilfe des entsprechenden Sicherungsequipments, da es an diesem Tag besonders heiß war. Die Gastgeber hatten aber genug Schirme und Erfrischungen parat, sodass am Ende des Tages alle Teilnehmer entspannt und ohne Sonnenbrand die Rückreise antreten konnten.



Eindrücke der Exkursion

„24. Kolloquium Hochspannungs- und Anlagentechnik“ vom 14.-16.07.2016 in Ostritz bei Zittau

Auch in diesem Jahr versammelten sich die Lehrstühle der Hochspannungstechnik der Hochschulen Ilmenau, München, Zittau/Görlitz und Dresden zum „Darmstädter Kreis“. Prof. Kornhuber aus Zittau veranstaltete damit sein Antrittsseminar in diesem Rahmen.
Nach der Ankunft der Teilnehmer am 14. Juli im Internationalen Begegnungszentrum im Kloster St. Marienthal fand eine Besichtigung der sanierten Räume des Fachgebiets Elektrotechnik in Zittau statt. Die Kollegen zeigten die umfassende Forschung auf dem Gebiet der Hochspannungstechnik und Werkstoffe.



Teilnehmer des 24. Kolloquium Hochspannungs- und Anlagentechnik

Die Fachvorträge aus dem Bereich Hochspannungstechnik zeigten die Notwendigkeit der Grundlagenforschung im Bereich der Hochspannungs-Gleichstromübertragung auf. Ergänzt wurde die Themen durch Werkstoffe, ruhende und schaltende Kontakte sowie Erwärmung. Die TU Dresden konnte hierbei ihre Kompetenz vor allem auch in Fragestellungen, die über Hochspannung hinaus gehen, aber zur Energieübertragung notwendig sind, aufzeigen. Ein Besuch der lausitzer Tagebaufolgelandschaft zeigte, welchen Preis die Region für den jahrzehntelangen Abbau von Braunkohle zahlen musste und welche Anstrengungen nötig sind, dieses Gebiet in eine Seenlandschaft zu überführen.
Die Professoren der eingeladenen Lehrstühle überreichten am Vorabend des letzten Veranstaltungstages die Gastgeschenke. Der „Darmstädter Kreis“ verbindet auf kollegialer Ebene die universitäre Forschung und wird im nächsten Jahr in Ilmenau fortgesetzt.

Assistentenfahrt der Professur Hochspannungs- und Hochstromtechnik nach Helbigsdorf vom 22.07. – 24.07.2016

Der seit vielen Jahren traditionelle Ausflug der Assistenten vom Lehrstuhl für Hochspannungs- und Hochstromtechnik und ihrer Familien führte in diesem Jahr ins nahegelegene Helbigsdorf bei Nossen. Die inmitten der Natur, direkt an der Triebisch gelegene Dietrichmühle diente uns als Unterkunft und Ort der Ruhe. Nach einem deftigen, selbstgemachten Mutzbraten am Freitagabend stand mit der „Grabentour" am Samstagvormittag nicht nur Bewegung, sondern auch der ein oder andere Einblick in die Relikte des Vorerzgebirgischen Bergbaus auf dem Programm. Am frühen Nachmittag konnte dann jeder die müden Beine bei einer gemütlichen Kutschfahrt ausruhen, um danach zu weiteren sportlichen Höchstleistungen beim KUBB-Turnier aufzulaufen. Nachdem das Siegerteam mit einer angemessenen Krone gekürt war, erwartete uns ein leckeres Grillbuffet. Am Sonntag wurden wir durch den wunderschönen Klosterpark in Altzella geführt und haben viel über dessen Geschichte und Gegenwart erfahren. Der Ausflug fand mit einem deftigen Mahl im „Heißen Stein" in Wendischbora seinen gemütlichen Ausklang.





Oben: Gruppenfoto am Einstieg in die Grabentour

Unten: Abfahrt der Kremser vor der Dietrichmühle

„Power"-Grill am 01.06.2016

Im Rahmen des „Power"-Grillens auf dem Hof der Hochspannungshalle nutzten auch 2016 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 Elektroenergietechnik im Hauptstudium zu erfahren. Die Hochspannungshalle sowie die Praktikumsversuchsstände und aktuelle 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.

Projekttag am 2. September 2016 in Radebeul

Die Welt besteht nicht nur aus Spannung und Strom, sondern aus noch viel mehr. Nun ist insbesondere das Wesen des Ingenieurs von Natur aus ein sehr Neugieriges. Das „Mehr", es muss erkundet werden! In diesem Sinne erforschten wir auch dieses Jahr, im Rahmen des Projekttages, die praktische Mechanik, europäische Kunstgeschichte und die Önologie. Von Dresden aus brachen wir in die Wein-, Villen- und Gartenstadt Radebeul auf.
Dort führte uns der Weg zu KBA, König & Bauer AG. Das Unternehmen stellt u. a. Maschinen zum Bogenoffsetdruck und zum Verpackungsdruck her. Wie das genau funktioniert, erklärte uns Jochen Mann, Abteilungsleiter der Berufsausbildung in einer sehr interessanten Werksführung. Vom Mittagessen bei KBA gestärkt, wanderten wir gemeinsam und bei schönstem Wetter zu Schloss Wackerbarth. Das Barockschloss, umgeben von Weinbergen, ist Sitz des Sächsischen Staatsweingutes. Wir besichtigten die Wein- und Sektkeller, die Abfüll- und Verkorkungsanlagen und erfuhren, warum die Sektflaschen gerüttelt und nicht geschüttelt werden. Mit der abschließenden Wein- und Sektverkostung klang der Projekttag 2016 gemütlich aus.



Schloss Wackerbarth
Foto: Jbergner/wikimedia
unter CC BY-SA 3.0



Teilnehmer des Projekttages
auf Erkundungstour
Foto: Stephan Schlegel



Park von Schloss Wackerbarth
Foto: Stromer7/wikimedia
unter CC BY-SA 4.0

17. International Workshop on High Voltage Engineering am IEEH vom 05.-08.09.2016

Nach einer fünfjährigen Unterbrechung fand in diesem Jahr der 17. „International Workshop on High Voltage Engineering“ statt. Das Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik lud dazu bei bestem spätsommerlichen Wetter die deutschen Partnerlehrstühle aus Cottbus-Senftenberg, Stuttgart und München sowie die polnischen Kollegen aus Breslau (Wrocław) und Posen (Poznań) nach Dresden ein.
Im Mittelpunkt der Veranstaltung standen zahlreiche, interessante Fachvorträge aus den verschiedensten Gebieten der Energie- und Hochspannungstechnik sowie der wissenschaftliche Austausch unter den Kollegen. Die Themengebiete umfassten dabei die elektrischen Netze sowie die festen, flüssigen und gasförmigen Isoliermedien, Herausforderungen in der Anwendung der Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ), aber auch nichtalltägliche Anwendungsgebiete der Hochspannungstechnik. Das vielfältige Rahmenprogramm bot zudem viele Möglichkeiten zum persönlichen und kulturellen Austausch. So konnten sich die Teilnehmer beim „Get-Together“ im „Feldschlößchen Stammhaus“ oder zum Grillabend am Institut näher kennenlernen und das Institut seine heiligen Hallen präsentieren. Eine Nachtwanderung mit dem Nachtwächter durch die Dresdner Neustadt bot zudem interessante Einblicke in das Dresden zur Zeit August des Starken. Ebenso wurde eine spannende Fachexkursion zum Transformatorenwerk der SIEMENS AG und zur HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH durchgeführt.



Gruppenfoto der Teilnehmer

Besonderer Dank geht an die RITZ Instrument Transformers GmbH in Dresden für die freundliche und sehr hilfreiche Unterstützung. Die Organisatoren bedanken sich ebenfalls bei den Gästen für die angenehme Atmosphäre zum Workshop und bei der SIEMENS AG und der HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH für die sehr interessanten Führungen.

Deutsch-Vietnamesische „Sommerschule zur Windenergie“ vom 12.-23.09.2016 in Vietnam

Vietnam befindet sich im wirtschaftlichen Aufbruch. Dadurch stieg die Stromnachfrage in den letzten Jahren um durchschnittlich 12 bis 15 %. Ziel der Regierung ist es einen Großteil des zusätzlichen Energiebedarfes durch Erneuerbare Energien zu decken. Die Windenergie hat dabei einen hohen Stellenwert.
Vor diesem Hintergrund veranstaltete die Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit eine interdisziplinäre Sommerschule. Im Zeitraum vom 12.–23. September kamen dazu an der Hochschule für Wissenschaft und Technologie in Hanoi insgesamt 30 ausgewählte Studierende aus Vietnam und Deutschland zusammen. Die Kursinhalte wurden von Mitarbeitern des Lehrstuhls für Elektroenergieversorgung, dem Lehrstuhl für Energiewirtschaft und dem Uniwind-Verein Freiberg zusammengestellt. Die Themen der Sommerschule reichten dabei von strömungsmechanischen und elektrotechnischen Grundlagen über energiewirtschaftliche Aspekte bis zur Netzplanung von Windparks. Abgerundet wurde die Sommerschule mit gemeinsamen Projektarbeiten, in denen die Studierenden ihr gelerntes Wissen anwenden konnten. Ein weiteres Highlight war eine Exkursion zum Windpark Phu Lac. Dieser ist einer der ersten drei fertiggestellten Projekte Vietnams, welcher im September 2016 erfolgreich an das Elektrizitätsnetz angeschlossen wurde.



Teilnehmer der Sommerschule zur Windenergie

Neben diesen wissenschaftlichen Inhalten nutzten die Teilnehmer die zwei Wochen auch für einen regen interkulturellen Austausch. Insgesamt stellte die Sommerschule somit nicht nur eine akademische, sondern auch kulturelle Bereicherung für alle dar.

10. Fachtagung „Arbeiten unter Spannung (AuS)“ am 13. und 14. September 2016 an der TU Dresden

Die Erfahrungen und den erreichten Stand beim Arbeiten unter Spannung im Rahmen einer ETG-Fachtagung in Dresden regelmäßig vorzustellen und zu diskutieren ist inzwischen Tradition. Der Fachausschuss V2.2 „Arbeiten unter Spannung“ der Energietechnischen Gesellschaft im VDE (ETG) und der VDE Bezirksverein Dresden luden deshalb im September 2016 für zwei Tage zur mittlerweile 10. Fachtagung „Arbeiten unter Spannung (AuS)“ an die Technische Universität Dresden ein. Die Wissenschaftliche Tagungsleitung und ein beachtlicher Teil der Organisation wurden, wie bei den vergangenen Fachtagungen, von Mitarbeitern unseres Institutes übernommen.
Die Fachbeiträge * und Vorträge waren den Schwerpunkten Arbeiten unter Spannung in Niederspannungs- sowie Mittelspannungsanlagen, Arbeiten unter Spannung an Gleichspannungsanlagen und Arbeiten in der Nähe unter Spannung stehender Teile (AiN) zugeordnet.
Ergänzt wurde das Vortragsprogramm durch eine Fachausstellung und durch Vorführungen von AuS-Technologien und –Ausrüstungen unter praxisnahen Bedingungen in der Hochspannungshalle des Institutes.
Ein Beitrag aus Anlass der 10. Fachtagung, der einen Überblick zur Entwicklung des Arbeitens unter Spannung in Deutschland in den letzten 25 Jahren vermittelte, unterstrich neuerlich, dass sich neben dem Arbeiten im spannungsfreien Zustand das Arbeiten unter Spannung (AuS) deutschlandweit als gleichwertige, sichere Methode zum Arbeiten an Elektroenergieübertragungsanlagen etabliert hat.

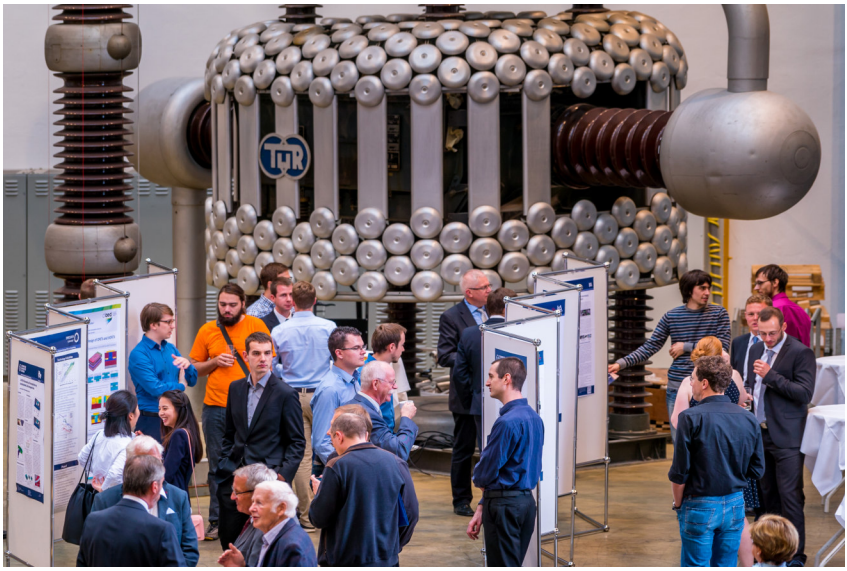


Vorführungen in der Hochspannungshalle
Foto: Falk Eusewig

*ETG-Fachbericht Band 149: *Arbeiten unter Spannung (AuS) - Vorträge der ETG-Fachtagung vom 13. bis 14. September 2016 in Dresden*. VDE VERLAG GMBH, Berlin Offenbach 2016.

Tag der Fakultät 2016

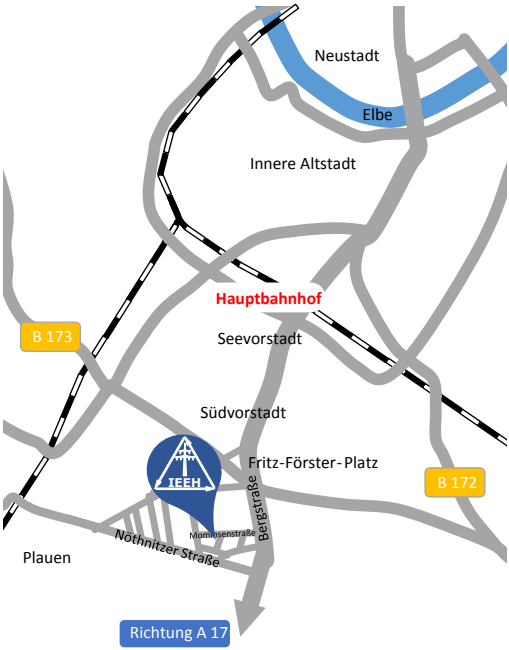
Der diesjährige Tag der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik fand am 30. September 2016 statt. Für die Vortragsreihe der Fachrichtung Elektroenergietechnik konnte neben den Vortragenden der Professuren Leistungselektronik, Elektroenergieversorgung, Elektrische Maschinen und Antriebe auch herausragende Referenten der InfraTec GmbH Dresden, der HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH und der Maschinenfabrik Reinhausen GmbH gewonnen werden. Anschließend haben die Doktoranden der Professuren im Rahmen einer Posterausstellung ihre aktuellen Forschungsergebnisse dem Fachpublikum zur Diskussion gestellt.
Im Anschluss hat mit dem spannenden Festvortrag „Klima im Wandel: Ursachen und Unsicherheiten der Erderwärmung“ von Herrn Prof. Bernhofer (Professur für Meteorologie an der TU Dresden) und Grußworten von Herrn Prof. Krauthäuser (Prorektor für Bildung und Internationales der TU Dresden) und Herrn Prof. Tetzlaff (Dekan der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik) die traditionelle Absolventenverabschiedung begonnen. Neben der Verabschiedung der Alumni wurden auch herausragende Studien- und Promotionsleistungen ausgezeichnet.
Mit Musik der Sunshine Dixieland Band und einem Grillbuffet konnten die Teilnehmer den Abend in gemütlicher Atmosphäre bei anregenden Diskussionen ausklingen lassen.



Posterpräsentation zum Tag der Fakultät 2016 in der Hochspannungshalle des IEEH
Foto: André Wirsig

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).