

Jahresbericht 2018

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 2018 über unsere Aktivitäten und wichtigen Ereignisse am Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik (IEEH) informieren und darauf aufmerksam machen, wie wir unseren Beitrag zur aktiven Mitgestaltung der anspruchsvollen, wissenschaftlichen Herausforderungen unserer Zeit leisten. Dabei können wir wieder auf eine erfolgreiche Lehre und Forschung zurückblicken.

Die weltweiten Veränderungen in der Energiewandlung, dem Energietransport, der Energiespeicherung und der Energieverteilung sowie der immer engeren Vernetzung mit Kommunikationstechnik, Digitalisierung und Industrieanwendungen und die sich daraus ergebenden Konsequenzen auf die Netze, Anlagen und Komponenten waren wieder ein zentrales Thema unserer Forschung, des Technologietransfers und der Lehre. Detailfragen zur Elektrifizierung des Verkehrs rücken zunehmend in den Fokus von Forschungspartnern, mit denen wir sehr gut zusammenarbeiten. Zahlreiche neue Forschungsprojekte unseres Instituts mit Partnern aus der Industrie und Energiewirtschaft sowie mit öffentlichen Einrichtungen (EU, Bund, DFG, AiF) haben die Zukunftstrends der Energietechnik im Fokus. Details hierzu können Sie den Forschungskurzberichten der wissenschaftlichen Mitarbeiter entnehmen. Erfreulicherweise erhielten einige unserer Mitarbeiter für Ihre Forschungsarbeiten hochrangige Auszeichnungen, wozu wir recht herzlich gratulieren.

Eine der Voraussetzungen für die hervorragenden wissenschaftlichen Leistungen ist die ausgezeichnete, engagierte Zusammenarbeit mit den Mitarbeitern des Labors und der Werkstatt. Besonders hervorzuheben ist dabei das unermüdliche Wirken unseres Laborleiters, Herrn Hans-Peter Pampel und des Meisters der mechanischen Werkstatt, Herrn Ralf Dittrich. Der immer größer werdende administrative Aufwand zur Organisation, Vor- und Nachbereitung der Forschungsprojekte wäre ohne die beiden Sekretärinnen, Frau Regina Scharf und Frau Ulrike Hendrich sowie das Projektmanagement mit Herrn Jan Keller und Frau Darja Leik undenkbar. Allen Beteiligten gilt ein ganz herzliches Dankeschön.

Die Absolventen der elektrischen Energietechnik rekrutieren sich im Wesentlichen aus den Studierenden in den Studiengängen „Elektrotechnik“ und „Regenerative Energiesysteme“. Die Anzahl der Studienanfänger ist auch in diesem Jahr in Folge leicht rückläufig. Trotz vielfältiger Bemühungen ist zu erwarten, dass dies mittelfristig wieder zu einer Reduktion der Absolventen in der elektrischen Energietechnik führen wird.

Um aktuelle wissenschaftlich-technische Themen in der Lehre zu platzieren, konnten wir für ausgewählte Vorlesungen 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, Herr Dr. Sergey Gortschakow, Herr Dr. Dirk Kunze und Frau Dr. Yvonne Saßnick. Bedanken möchten wir uns auch bei Herrn Prof. Dr. Gert Hentschel, Herrn Prof. 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, Dr. Joachim Speck und Prof. Gert Winkler. Sie haben uns im letzten Jahr wieder mit Rat und Tat unterstützt. Hier sei im Besonderen die Übergabe der Dokumentation zur Technischen Sammlung "Hochspannungstechnik" durch Dr. Eberhard Engelmann, Prof. Klaus Schwarzer und Dr. Horst Klengel genannt.

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 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, Freunden und Partnern des Instituts für ihre tatkräftige Mitarbeit und Unterstützung im vergangenen Jahr zu danken.

Wir wünschen Ihnen ein gesundes, erfolgreiches und frohes Jahr 2019 und freuen uns auf eine weiterhin gute Zusammenarbeit.

Dresden, Dezember 2018



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	10
2.1 Lehrveranstaltungen.....	10
2.1.1 Lehrveranstaltungen für das Grundstudium	10
2.1.2 Lehrveranstaltungen für das Hauptstudium.....	10
2.1.3 Lehrexport an andere Fakultäten – Grundstudium.....	12
2.2 Studentische Arbeiten	13
2.2.1 Studienarbeiten und Forschungspraktika	13
2.2.2 Diplom- und Masterarbeiten.....	15
3 Forschung	18
3.1 Lehrstuhl Elektroenergieversorgung.....	18
3.1.1 Forschungsschwerpunkte und Forschungsprojekte.....	18
3.1.2 Publikationen.....	74
3.2 Lehrstuhl Hochspannungs- und Hochstromtechnik	84
3.2.1 Forschungsschwerpunkte und Forschungsprojekte.....	84
3.2.2 Publikationen.....	114
3.3 National Arc fault Research Center	118
3.4 Preise und Auszeichnungen.....	120
3.5 Habilitationen.....	122
3.6 Promotionen.....	124
4 Kooperationen	130
4.1 Wissenschaftskooperationen.....	130
4.2 Industriekooperationen.....	132
4.3 Kommissions- und Gremienarbeit	134
4.3.1 Lehrstuhl Elektroenergieversorgung.....	134
4.3.2 Lehrstuhl Hochspannungs- und Hochstromtechnik.....	135
5 Veranstaltungen	136

Titelbild: Störlichtbogenversuch mit 10 kA Lichtbogenstrom am National Arc fault Research Center des Instituts für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik

Foto: NARC – National Arc fault Research Center

1 Personelle Besetzung

1.1 Lehrstuhl Elektroenergieversorgung

Titel	Nachname	Vorname	Telefon (0351-463-)
<i>Leiter der Professur</i>			
Prof. Dr.-Ing.	Schegner	Peter	34374/ Fax 37036
<i>Hochschullehrer</i>			
Hon.-Prof. Dr.-Ing.	Hable	Matthias	
Hon.-Prof. Dr.-Ing.	Hentschel	Gert	
Dozent Dr.-Ing.	Bauer	Hartmut	35104
Prof. Dr.-Ing. habil.	Winkler	Gert	35088
<i>Dozenten und Lehrbeauftragte</i>			
Dr.-Ing.	Meyer	Jan	35102
Dr.-Ing.	Meyer	Jörg	35272
Dr.-Ing.	Saßnick	Yvonne	
Dipl.-Ing.	Schindler	Jörg	
<i>Sekretariat</i>			
	Scharf	Regina	33202
<i>Projektmanagement</i>			
Dipl.-Ing.	Keller	Jan	35432
<i>Wissenschaftliche Mitarbeiter</i>			
Dr.-Ing.	Blanco	Ana Maria	32482
Dipl.-Ing.	Bruhns	Michael	35104
M.Sc.	Cabadag	Rengin Idil	43205
Dr.-Ing.	Domagk	Max	35223

Titel	Nachname	Vorname	Telefon (0351-463-)
<i>Wissenschaftliche Mitarbeiter</i>			
Dipl.-Ing.	Erdmann	Niels	43203
Dipl.-Ing.	Frowein	Karla	37869
Dipl.-Ing.	Gasch	Etienne	43206
Dipl.-Ing.	Heß	Tobias	32941
M.Sc.	Jäschke	Christian	35353
Dipl.-Ing.	Kaufhold	Elias	43201
M.Sc.	Khokhlov	Victor	43208
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
M.Sc.	Nilges	Matthias	40438
Dipl.-Ing.	Palm	Sebastian	33094
M.Sc.	Pourarab	Morteza	40665
Dipl.-Ing.	Rasti	Sasan	40766
Dipl.-Ing.	Schmidt	Maximilian	43081
Dipl.-Ing.	Schnelle	Tobias	33725
Dipl.-Ing.	Seidel	Paul	35117
Dipl.-Ing.	Stiegler	Robert	32217
M.Sc.	Tavukcu	Ebru	43201
M.Sc.	Weis	Irina	40764
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-)
<i>Leiter der Professur</i>			
Prof. Dr.-Ing.	Großmann	Steffen	33428/ Fax 37157
<i>Professoren und Hochschullehrer im Ruhestand</i>			
Prof. Dr.-Ing. habil.	Eberhardt	Martin	
Dr.-Ing.	Engelmann	Eberhard	
PD Dr.-Ing. habil.	Löbl	Helmut	32138
Dr.-Ing.	Speck	Joachim	33105
<i>Dozenten und Lehrbeauftragte</i>			
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.	Schlegel	Stephan	32746
<i>Sekretariat</i>			
	Hendrich	Ulrike	33428
<i>Projektmanagement</i>			
LL.M.	Leik	Darja	32963
<i>Wissenschaftliche Mitarbeiter</i>			
Dipl.-Ing.	Adam	Robert	34789
Dr.-Ing.	Backhaus	Karsten	33608

Titel	Nachname	Vorname	Telefon (0351-463-)
<i>Wissenschaftliche Mitarbeiter</i>			
Dr.-Ing.	Baumann	Matthias	33080
Dipl.-Ing.	Bäuml	Katrin	(extern)
M.Sc.	Dowbysch	Andreas	seit 15.11.2018
Dipl.-Ing.	Fuhrmann	Torsten	bis 31.8.18
Dipl.-Ing.	Gabler	Tobias	40518
Dipl.-Ing.	Götz	Thomas	40519
Dipl.-Ing.	Heger	Julian	bis 31.10.18
Dr.-Ing.	Hildmann	Christian	33917
Dipl.-Ing.	Israel	Toni	34756
Dipl.-Ing.	Kühnel	Christian	40516
Dipl.-Ing.	Linde	Thomas	40520
			seit 01.02.2018
Dipl.-Ing.	Oberst	Marcella	39982
Dipl.-Ing.	Pampel	Hans-Peter	33103
Dipl.-Ing.	Ramonat	Alexander	bis 31.10.18
Dipl.-Ing.	Schladitz	Markus	34948
Dr.-Ing.	Schlegel	Stephan	32746
Dipl.-Ing.	Voigt	Matthias	33080
<i>Technische Angestellte</i>			
Dipl.-Ing. (FH)	Göres	Axel	32613

1.3 Labor und Werkstatt

Nachname	Vorname	Telefon (0351-463-)
Dittrich	Ralf	34745
Eusewig	Falk	40608
Gläser	Michael	34757
Jaroscziński	Gerd	34745
Knüpfel	Helge	34260
Reichelt	Eric	34745
Wermuth	Peter	33516

2 Lehre

2.1 Lehrveranstaltungen

2.1.1 Lehrveranstaltungen für das Grundstudium

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

2.1.2 Lehrveranstaltungen für das Hauptstudium

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

Vorlesungen / Übungen / Praktika	SS	WS
<i>Modul Systemverhalten und Versorgungsqualität elektrischer Energieversorgungssysteme</i>		
Betriebsvorgänge in Energieversorgungssystemen <i>Prof. Schegner</i>	2/1/0	
Versorgungsqualität <i>Prof. Schegner / Dr. Jan Meyer</i>	1/1/0	
Komplexpraktikum zum Netzbetrieb	0/0/1	
<i>Modul Planung elektrischer Energieversorgungssysteme</i>		
Netzplanung <i>Prof. Schegner / Prof. Hable</i>	1/1/0	
Elektroenergieanlagenprojektierung <i>Prof. Schegner / Prof. Hentschel</i>	1/1/0	
Netzberechnung <i>Prof. Schegner</i>	2/2/0	
<i>Modul Vertiefung Hochspannungstechnik</i>		
Vertiefung Hochspannungstechnik <i>Prof. Großmann / Dr. Backhaus / Dipl.-Ing. Pampel</i>	5/0/0	
Praktikum Vertiefung Hochspannungstechnik	0/0/1	
<i>Modul Beanspruchung elektrischer Betriebsmittel</i>		
Beanspruchung elektrischer Betriebsmittel <i>Prof. Großmann / Dr. Schlegel / Dipl.-Ing. Adam</i>		3/0/0
Beleg Geräte der Energietechnik <i>Prof. Großmann</i>		0/1/0
Praktikum Beanspruchung elektrischer Betriebsmittel		0/0/2
<i>Modul Schutz- und Leittechnik in elektrischen Energieversorgungssystemen</i>		
Selektivschutztechnik <i>Prof. Schegner / Dr. Jörg Meyer</i>		2/1/0
Leittechnik <i>Prof. Schegner / Dipl.-Ing. Schindler</i>		1/1/0
Praktikum Sekundärtechnik		0/0/1
<i>Modul Experimentelle Hochspannungstechnik</i>		
Experimentelle Hochspannungstechnik <i>Prof. Großmann / Dipl.-Ing. Pampel</i>		4/0/0
Praktikum Experimentelle Hochspannungstechnik		0/0/2

Vorlesungen / Übungen / Praktika	SS	WS
<i>Weitere Vertiefungsfächer</i>		
Elektrische Lasten und Lastmanagement <i>Prof. Schegner</i>		1/1/0
<i>Ausgewählte Kapitel der Elektrischen Energietechnik</i>		
Freileitungsbau Hochspannungsgeräteentwicklung <i>Prof. Großmann / Dr. Papailiou / Gastdozenten</i>	2/1/0	
Projekte im Übertragungsnetz <i>Dr. Saßnick</i>		1/1/0

2.1.3 Lehrexport an andere Fakultäten – Grundstudium

Vorlesungen / Übungen / Praktika	SS	WS
Hochspannungs- und Hochstromtechnik (für Wirtschaftsingenieure) <i>Prof. Großmann</i>		2/1/1
Praktikum Elektrotechnische Systeme im Maschinenbau <i>Prof. Großmann</i>	0/0/1	
Elektrotechnik für Verfahrens- und Naturstofftechnik und Werkstoffwissenschaften <i>Prof. Großmann</i>		2/2/0
Elektroenergietechnik (für Wirtschaftsingenieure, Lehramt - SEBS) <i>Prof. Schegner</i>	0/0/1	3/1/0
Elektroenergietechnik (für Lehramt - WTH) <i>Prof. Schegner</i>		1/1/1
Betriebsmittel und Berechnungsgrundlagen für elektrische Energieversorgungssysteme (für Wirtschaftsingenieure, Lehramt) <i>Prof. Schegner</i>		2/1/0
Grundlagen der Elektroenergieanlagen (für Wirtschaftsingenieure, Lehramt) <i>Prof. Schegner</i>		1/1/0
Netzberechnung (für Wirtschaftsingenieure) <i>Prof. Schegner</i>	2/2/0	

2.2 Studentische Arbeiten

2.2.1 Studienarbeiten und Forschungspraktika

Richter, Robert

Aufbau eines thermischen Modells für einen explosionsgeschützten Niederspannungs-Lastschalter

22/2016 (Betreuer: Dipl.-Ing. Heger)

Richter, Tim

Untersuchen der elektrischen Eigenschaften verschiedener Fügeverfahren im Fahrzeug- und Maschinenbau

06/2017 (Betreuerin: Dipl.-Ing. Oberst)

Kaiser, Franziska

Experimentelle Untersuchungen zu Hysterese- und Wirbelstromverlusten in Bügelklemmen

09/2017 (Betreuer: Dipl.-Ing. Heger)

Richter, Dominik

Umfassende Darstellung der Kippschwingungsthematik

10/2017 (Betreuer: Dr.-Ing. Jörg Meyer)

Emmerich, Maximilian

Untersuchungen des Einflusses der Oberflächenbeschichtung von Elektroden auf das Durchschlagverhalten von Gasisolierungen bei Gleichspannungsbelastung

13/2017 (Betreuer: Dipl.-Ing. Götz)

Schmidt, Michael

Aufbau eines Prüfplatzes zur Untersuchung der Messgenauigkeit elektronischer Energiezähler („Smart Meter“)

15/2017 (Betreuer: Dipl.-Ing. Stiegler)

Schädlich, Alexander

Analyse der Strom- und Spannungsqualität beim Betrieb von Haushaltsgeräten unter Inselnetzbedingungen

16/2017 (Betreuer: Dipl.-Ing. Müller)

Naubereit, Nick

Vergleichende Bewertung von Modellierungs- und Berechnungsmethoden der induktiven und kapazitiven Kopplung von Hochspannungsfreileitungen

17/2017 (Betreuer: Dipl.-Ing. Liebermann)

Elspaß, Lena

Messen von Teilentladungen bei repetierender Impulsspannung

19/2017 (Betreuer: Dr.-Ing. Backhaus)

Hwang, Su Hyun

Einfluss der Netzkonfiguration auf die im Fehlerfall wirksame, frequenzabhängige Netzimpedanz

20/2017 (Betreuerin: Dipl.-Ing. Frowein)

Zhao, Zhe

Einfluss von vorgelagerten Netzen auf während des Erdschlusses wirksame, frequenzabhängige Netzimpedanz

21/2017 (Betreuerin: Dipl.-Ing. Frowein)

Dehn, Mareike

Untersuchung der spannungsabhängigen Leistungsaufnahme von MS-Verteilnetzen unter Berücksichtigung dezentraler Erzeugungsanlagen

22/2017 (Betreuer: Dipl.-Ing. Palm)

Blum, Isabelle

Impact of network harmonic impedance on the performance of methods for harmonic contribution assessment

23/2017 (Betreuer: Dr.-Ing. Jan Meyer/M. Sc. Pourarab)

Nguyen, Nhat Nam

Erkennung von fehlerhaften Eingangsdaten bei der Zustandsidentifikation im Verteilnetz

24/2017 (Betreuer: Dipl.-Ing. Schmidt)

Graul, Arne

Untersuchung der Gleichzeitigkeit und Gleichphasigkeit von Oberschwingungsemissionen in öffentlichen Niederspannungsnetzen

25/2017 (Betreuer: Dr.-Ing. Domagk)

Büttner, Lukas

Stromtragfähigkeit und Langzeitverhalten von umformtechnischen Verbindungen insbesondere im Bereich der Elektromobilität

26/2017 (Betreuer: Dipl.-Ing. Ramonat)

Fuchs, Tom

Untersuchungen zum Durchschlagverhalten von Öl-Papier-isolierten Anordnungen bei Mischspannungsbelastung

27/2017 (Betreuer: Dipl.-Ing. Gabler)

Liu, Zhijie

Überarbeitung, Aktualisierung und Digitalisierung des Wissensspeicherheftes des IEEH
28/2017 (Betreuer: Dr.-Ing. Jörg Meyer)

Raab, Anna Lisa

Konzeption und Installation eines Lastmanagementsystems für die Elektromobilität in der Niederspannung
01/2018 (Betreuer: Dipl.-Ing. Heß)

Bujdo, Damir

Bestimmung der druckabhängigen Durchschlagsspannung von synthetischer Luft
02/2018 (Betreuer: Dipl.-Ing. Götz)

Tittjung, Alexander

Konzeption zur Erweiterung des Störlichtbogenversuchsstandes
03/2018 (Betreuer: M. Sc. Wenzlaff)

Zoch, Sebastian

Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss oberflächenmontierter Thermolemente auf die gemessene Temperatur
04/2018 (Betreuer: Dipl.-Ing. Heger)

2.2.2 Diplom- und Masterarbeiten

Schmidt, Christopher

Entwicklung und Modellierung von Szenarien zur lokalen Weiterversorgung in Bobritzsch bei Versorgungsunterbrechungen
03/2017 (Betreuer: Dipl.-Ing. Palm)

Neubert, Jacob

Modellierung des Hystereseverhaltens typischer Transformator-, Spannungs- und Stromwandler-Kernmaterialien bei netztypischen Spannungs- und Stromverläufen
04/2017 (Betreuer: M. Sc. Jäschke)

van Treeck, Robert

Ermittlung der Zellkapazität alternder Lithium-Ionen-Zellen aus unter Betriebsbedingungen erfassten Messdaten
05/2017 (Betreuer: Dr. Potthoff – IVI)

Linde, Thomas

The Technologies Used for Reactive Power Management in 380 kV Transmission Grid and Their Impacts on Grid Operation
06/2017 (Betreuerin: M. Sc. Cabadag)

Bauer, Michael

Messen impulsförmiger Ströme in mineralischem Isolieröl bei auftretenden Vorentladungen

07/2017 (Betreuer: Dipl.-Ing. Gabler)

Siemens, Anton

Signaltheoretische Untersuchung von Detektionsverfahren zur Erkennung von Schaltlichtbögen

08/2017 (Betreuer: M. Sc. Wenzlaff)

Yan, Yan

Vergleich rechnerischer und experimenteller Methoden zum Bestimmen des Beiwertes für Strömungswiderstände von Lüftungsgittern

09/2017 (Betreuer: Dipl.-Ing. Adam)

Biebrach, Lars

Entwicklung einer Methode zur messtechnischen Bestimmung des Beitrages einer Kundenanlage zur Spannungsunsymmetrie

10/2017 (Betreuer: Dipl.-Ing. Möller)

Li, Yan

Charakterisierung der Oberschwingungsemission einzelner und parallel betriebener Haushaltgeräte

11/2017 (Betreuer: Dipl.-Ing. Müller)

Zheng, Haitao

Basic signal theoretical investigations for the identification of residential electrical devices

12/2017 (Betreuerin: Dipl.-Ing. Ma)

Rasti, Sasan Jacob

Berechnung der Einsatzgrenzen des Verteilnetzes unter Berücksichtigung des Blindleistungsmanagements

13/2017 (Betreuer: Dipl.-Ing. Heß)

Müller, Lisa

Entwicklung und Verifikation von Algorithmen zur Bestimmung der Verluste in Niederspannungsnetzen anhand von Strukturdaten

01/2018 (Betreuer: Prof. Schegner)

Herbrig, Felix

Einfluss von thermischer Dehnung und Sauerstoff auf die Alterung von Bimetallverbindungen mit Aluminium und Kupfer

02/2018 (Betreuerin: Dipl.-Ing. Oberst)

Rudolph, Michael

Erneuerung der Stationsleittechnik und Konzeption eines Praktikumsversuches am Dynamischen Netzmodell (DNM)

03/2018 (Betreuer: Dr.-Ing. Jörg Meyer)

Liu, Xingwang

Algorithmen zur Lastprädiktion für individuelle Haushalte basierend auf detaillierten Messdaten

04/2018 (Betreuerin: Dipl.-Ing. Ma)

Grevermer, Anne

Evaluation of measurement methods for the frequency range 2-150 kHz

05/2018 (Betreuer: Dr.-Ing. Jan Meyer)

Kaufhold, Elias

Systematische Analyse der Einflussfaktoren auf harmonische Instabilitäten bei Photovoltaik-Wechselrichtern

07/2018 (Betreuer: Dr.-Ing. Jan Meyer)

Seihn, Peer

Aufbau eines thermischen Modells des Gleitstuhls und der Rippenplatte einer Weiche

08/2018 (Betreuer: Dipl.-Ing. Schladitz)

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) werden künftig auch Elektrofahrzeuge, Speicher und zunehmend energieeffiziente Geräte an das Niederspannungsnetz angeschlossen. Darüber hinaus erfolgt die Integration von kleinen und kleinsten Blockheizkraftwerken, sogenannte Mikro-KWK-Anlagen, in diese Netzebene. Zukünftig wird ein sehr großer Teil der elektrischen Energie in der heutigen Verteilnetzebene eingespeist. Hierdurch entstehen vollkommen neue Anforderungen an die Betriebsführung, den Selektivschutz und an die Versorgungsqualität sowohl in der Verteilnetzebene als auch im Übertragungsnetz. 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 in Verteilnetzen unter veränderten und unscharfen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen
- Nachhaltige Energiesysteme - Interdependenz von technischer Gestaltung und gesellschaftlicher Akzeptanz
- SaxoGrid – Sicherer Betrieb von Verteilnetzen für erneuerbare Energie in Sachsen
- Entwicklung zellular organisierter Energiesysteme mit fraktaler Struktur
- Stabilitätsbetrachtungen für dezentrale Erzeuger in Verteilnetzen

- Systemdienstleistungen in Flächenverteilnetzen
- Sternpunktbehandlung in Verteilnetzen

Power Quality

- Messgeräte-unabhängiges Datenbanksystem zur zentralen Speicherung von Messdaten der Elektroenergiequalität
- Neue Verfahren zur automatisierten, ortsübergreifenden Analyse der Spannungsqualität bei großen Datenmengen
- Internetbasierte Austauschplattform für gemessene Oberschwingungsspektren von Haushaltsgeräten; PANDA (equipment hArmonic Database)
- Einfluss von Elektrofahrzeugen und Photovoltaik-Wechselrichtern auf die Strom- und Spannungsqualität im Niederspannungsnetz
- Netzverträglichkeit in öffentlichen Niederspannungsnetzen im Frequenzbereich von 2 kHz bis 150 kHz (Ursachen, Ausbreitung, Modellierung, Störfestigkeit)
- Methoden zur Berechnung von Emissionsgrenzwerten für Kundenanlagen (Harmonische, Zwischenharmonische, Supraharmonische und Unsymmetrie)
- Invasive und nichtinvasive Methoden zur Bestimmung der frequenzabhängigen Netzimpedanz
- Messtechnische Bestimmung des frequenzabhängigen Übertragungsverhaltens von Strom- und Spannungswandlern

Schutz- und Leittechnik

- Untersuchung stromstarker Niederspannungsstörlichtbögen am National Arc fault Research Center (NARC)
- Algorithmenentwurf zur schnellen Detektion von Störlichtbögen
- Entwurf digitaler Schutzalgorithmen
- Auswirkungen der verstärkten Einbindung von großen Windparks in das Übertragungsnetz auf das Netzschutzsystem
- Grundlagen des übergeordneten Schutzes von elektrischen Transport- und Verteilungssystemen (Systemschutz)
- Auswertung von Störfallaufzeichnungen
- Verfahren zur Inselnetzdetektion und -prävention sowie Bewertung der Wahrscheinlichkeit ungewollter Inselnetze
- Modellierung von Strom- und Spannungswandler zur Beurteilung der Tauglichkeit im Schutzsystem
- Entwurf von Schutzkonzepten spezieller Betriebsmittel
- Grundlagenuntersuchung zum Schutz bei Zwischensystemberührungen

Smart Grid

- Planungs- und Betriebsalgorithmen für Virtuelle Kraftwerke
- Optimierung des Erzeugungs- und Lastenmanagements für Markt- und Netzingregation
- Zustandsidentifikation in Verteilungsnetzen
- Automatisierte Analyse von Lasten und Lastgruppen in Niederspannungsnetzen
- Automatisierte Parameteridentifikation und energetische Bewertung und Optimierung des Betriebs von dezentralen Energieanlagen
- Combined Energy Lab - thermische und elektrische Versuchseinrichtung zum Test von Mikro-KWK-Anlagen

Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Energie- und Messwandler“



Christian Jäschke, M.Sc.

Entwurf eines effizienten Magnetkreises für ein magnetokalorisches Klimatisierungssystem

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Im Zuge eines Forschungsprojektes wird eine Klimaanlage entwickelt, in der magnetokalorisches Material zur Kälteerzeugung verwendet wird [1]. Setzt man magnetokalorische Materialien einer hohen magnetischen Flussdichte aus, erwärmen sich diese. Wird diese Wärme abgeführt und anschließend die magnetische Flussdichte reduziert, kühlt sich das Material gegenüber der Anfangstemperatur ab.

Zum Erreichen einer hohen Temperaturdifferenz muss innerhalb des magnetokalorischen Materials eine möglichst hohe magnetische Flussdichteänderung (ΔB) erzeugt werden. Dabei ist die Menge an Permanentmagneten zu minimieren, da diese die teuersten Komponenten innerhalb des Magnetkreises sind. Bild 1 zeigt den Entwurf eines optimierten Magnetkreises, in dem das magnetokalorische Material in Kammern mit einem Querschnitt von 50 mm × 10 mm untergebracht ist.

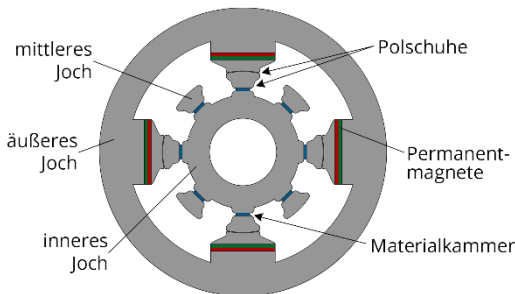


Bild 1: Aufbau eines Magnetkreises einer magnetokalorischen Klimaanlage.

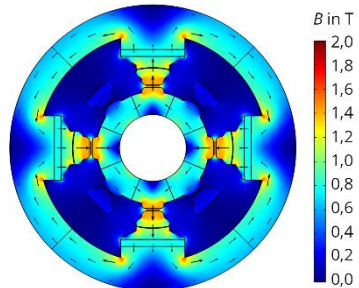


Bild 2: FEM Berechnungsergebnis für $\Delta B = 1,4$ T.

Der Magnetkreis besteht aus einem drehbaren äußeren Joch (Rotor), an dem Permanentmagnete und Rotor-Polschuhe befestigt sind. Die Kammern mit dem magnetokalorischen Material befinden sich innerhalb des Stators, zwischen dem inneren Joch und den mittleren Jochen.

Die Permanentmagnete erzeugen magnetische Flüsse, die durch die Rotorpolschuhe und die mittleren Jochen zu den Materialkammern geleitet werden. Die Verjüngung der Polschuhe bewirkt dabei eine Konzentration (Verstärkung) der magnetischen Flussdichte. Durch die wechselnde Ausrichtung der Permanentmagnete kompensieren sich die magnetischen Flüsse aller Schenkel im inneren und äußeren Joch.

In der Ausgangslage (Bild 2) sind die Hälfte der Materialkammern von einer hohen magnetischen Flussdichte durchsetzt; die andere Hälfte ist nahezu feldfrei. Wird der Außenrotor um 45° gedreht, bewegt sich jeder Rotorpolschuh von einem mittleren Joch zu seinem benachbarten. Dabei kommutieren die magnetischen Flüsse von den, bis dahin, flussdichtedurchsetzten zu den feldfreien Materialkammern. Nach Beendigung des Kommutierungsvorgangs hat sich die magnetische Flussdichte in jeder Materialkammer geändert.

Die erzielbare Änderung der magnetischen Flussdichte im magnetokalorischen Material hängt stark vom geometrischen Aufbau des Magnetkreises ab. Um die Permanentmagnete optimal auszunutzen, müssen deren Proportionen so gewählt werden, dass die Magnete im optimalen Arbeitspunkt betrieben werden. Um dies zu gewährleisten, wurde durch einen Optimierungsalgorithmus das Verhältnis aus Länge und Breite der Magnete bestimmt, das die größte Flussdichteänderung innerhalb einer Materialkammer bewirkt.

Wegen der geringen Permeabilität des magnetokalorischen Materials hat die Kontur der Polschuhe einen großen Einfluss auf die erreichbare magnetische Flussdichte innerhalb der Materialkammern. Wären die Kanten der Polschuhe rechtwinklig abgeschlossen, würde an den Eckbereichen eine stark inhomogene Flussdichteverteilung auftreten, was eine geringere mittlere Flussdichte innerhalb der Materialkammern zur Folge hätte. Die höchsten Flussdichten innerhalb der Materialkammern lassen sich erzielen, wenn die Polschuhe die Kontur eines Rogowskiprofiles (Bild 3) aufweisen. Rogowski leitete in [2] die Kontur eines Plattenkondensators her, bei der die elektrischen Feldstärkeüberhöhungen an den Rändern minimiert werden. Da sich raumladungsfreie elektrostatische und stromdichtefreie magnetostatische Problemstellungen durch den selben Typ partieller Differentialgleichung beschreiben lassen, stellt das Rogowskiprofil auch die Polschuhgeometrie mit den geringsten Feldstärkeüberhöhungen am Rand dar. Bild 4 zeigt, dass nur durch Verwendung des Rogowskiprofiles die mittlere Flussdichte innerhalb der Materialkammern um ca. 0,1 T steigt.

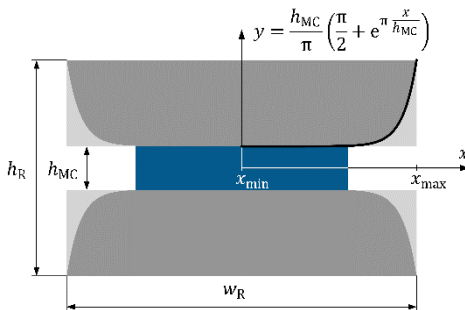


Bild 3: Kontur eines Polschuhs mit Rogowskiprofil

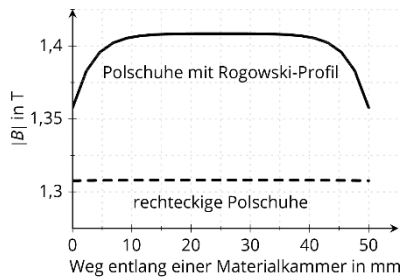


Bild 4: Vergleich der Polschuhentypen.

- [1] J. Seifert, L. Schinke, M. Beyer, C. Jäschke, M. Krautz, A. Waske, S. Grasemann, P. Vogel, C. Schünemann. *Solare magnetokalorische Klimatisierung von Gebäuden (SOMAK)*. Zwischenbericht zum Forschungsprojekt, TU Dresden, 2018.
- [2] W. Rogowski. *Die elektrische Festigkeit am Rande des Plattenkondensators*. Archiv der Elektrotechnik, vol. 12, pp. 1-15, 1923.



Matthias Nilges, M.Sc.

Einfluss geometrischer und materialabhängiger Parameter auf das Übertragungsverhalten von Spulenanordnungen

Steile Spannungsimpulse, beispielsweise durch Vakuum-Leistungsschalter hervorgerufen, sowie anhaltende höherfrequente Anregungen von Umrichtern führen zu einer starken Belastung der Isolation von Transformatoren und elektrischen Maschinen [1]. Mit Hilfe von Berechnungsmodellen [2, 3] können kritische Fälle untersucht und das Spulendesign entsprechend angepasst werden, um Ausfälle und Beschädigungen zu vermeiden.

Das frequenzabhängige Verhalten von Spulenanordnungen hängt von vielen Faktoren ab – hierzu zählen vor allem der geometrische Aufbau der Spulen, als auch die verwendeten Isoliermaterialien. Daher ist es für eine hinreichend genaue Modellierung erforderlich, welche die Einflüsse aller Parameter auf die Spulencharakteristik berücksichtigt. Aus diesem Grund ist mit Hilfe einer Parameterstudie auf Basis von FEM-Simulationen der Einfluss verschiedener Kenngrößen auf die Resonanzen einer typischen Spulenanordnung untersucht worden. Die betrachteten Parameter sind gemäß Bild 1 die Dicke des Isolierlacks d_{Lack} , der Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Windungen Δz_{Wind} , der Abstand zwischen zwei Lagen d_{Vlies} , die horizontale Verschiebung zwischen zwei Lagen Δz_{Lagen} , die Verschiebung der ersten Windung einer Lage (hervorgerufen durch den Übergang zur nächsten Lage) Δz_{Erste} sowie die relative Permittivität des Isolierlacks $\epsilon_r \text{ Lack}$ und des Epoxidharzes zwischen den Lagen $\epsilon_r \text{ Vlies}$.

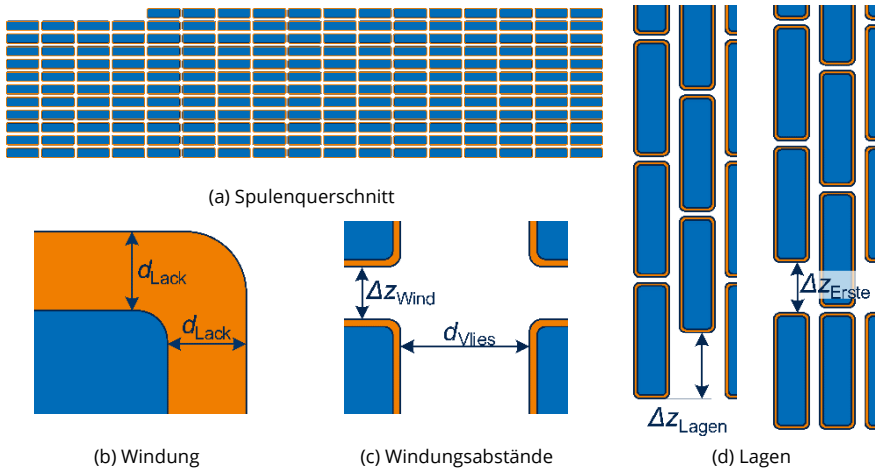


Bild 1: Kennzeichnung der variierten geometrischen Parameter

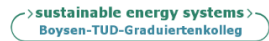
Zur Untersuchung des gegenseitigen Einflusses wurden alle Kombinationen dieser sieben Kenngrößen in drei Schritten (50 %, 80 % und 100 % des Erwartungswertes) variiert. Es

Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Planung und Betrieb von Netzen“



Rengin Idil Cabadag, M.Sc.
**Reactive Power Management in
 High Voltage Power Grids and
 its Impact on Grid Operation**

Gefördert durch:



The synchronous generators of large power plants in 380 kV transmission grids used to be the key player in controlling the system voltage by regulating reactive power. The availability of these power plants is decreasing due to energy transition actions. In parallel, the implementation of distributed generators (DG) is increasing drastically.

DGs are capable of maintaining the reactive power to 110 kV sub-transmission grids but additional compensation devices will be necessary to ensure the voltage stability of especially 380 kV transmission grids. Since the long-term voltage stability depends on the available amount of inductive and capacitive reactive power implying (quasi-)stationary processes, the short-term stability depends on the dynamic performance of reactive power sources.

During normal operation, under constant load and topology, energy exchanges are not modeled and the system behavior can be represented by voltage and current phasors in the frequency domain. However, following switching events and system disturbances (short-circuit, earth fault, lightning etc.), the energy exchanges subject to higher stress resulting in excessive voltage variations, namely transients.

The electromagnetic transient analysis (EMT) is conducted to see the behavior of selected compensators in mitigating voltage fluctuations in IEEE 9-bus grid. The compensators are located to the weakest bus. The weakest bus is defined as the critical bus that is closest to the voltage instability after analysis of P-V curves (see Fig. 1).

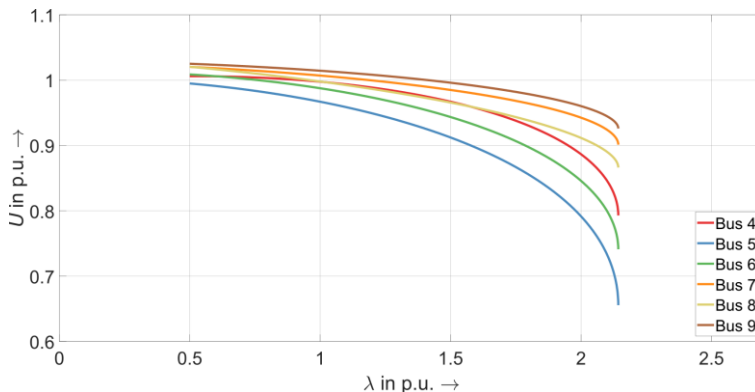


Fig. 1: P-V curves for the weakest bus in the IEEE 9-bus grid

The long-term voltage stability is assessed in the quasi-stationary period by investigating the voltage under different load conditions determined by λ . The simulation results for each compensation technology are compared by calculating the load margin (LM) for long-term voltage stability.

The investigation of short-term voltage stability requires detailed modelling of all network elements including compensators, loads and generators for EMT simulations. The selected compensators are represented by verified control approaches and are subject to their reactive power output limitations. The electrical loads are voltage dependent and are represented by a static and dynamic part:

$$\begin{aligned} P &= P_{stat} + P_{dyn} \\ Q &= Q_{stat} + Q_{dyn} \end{aligned} \quad (1)$$

The short-term voltage stability index (SVSI) is calculated from the voltage response after applying the selected operations to the system. Fig. 2 shows the calculation of the SVSI after a short-circuit that is cleared in 0.1 s.

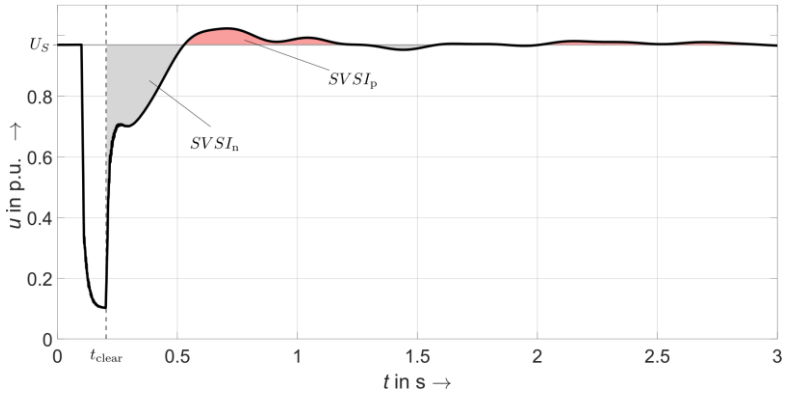


Fig. 2: Calculation of the SVSI

The values of SVSI and LM for the conducted scenarios and several compensators are displayed in Table 1 proving that STATCOM and synchronous condenser show better performance in stationary and dynamic voltage regulation issues.

Table 1: The numerical results of LM and QM

Metric	Base Case	STATCOM	Static Var Systems	Synchronous Condenser	Switched Capacitor
LM	2.143	2.497	2.379	2.497	2.379
SVSI	0.087	0.023	0.026	0.042	-

- [1] J. T. Linde, R. I. Cabadag and P. Schegner. *Comparative Assessment of Reactive Power Management Technologies and Their Impacts on Grid Operation*. In: 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2018.



Niels Erdmann, Dipl.-Ing.
Loop-Circle-Arc-Theorie (LoCA)
Erste Simulationsansätze zur
Implementierung einer
Energieflussregelung

Gefördert durch:
DFG Deutsche
 Forschungsgemeinschaft

Die gewachsenen Systeme der Strom-, Gas- und Wärmeversorgung haben sich über 100 Jahre entwickelt. Sie waren konzipiert um Energie von großen, zentralen Kraftwerken an verteilte Verbraucher zu übertragen. Um auch zukünftig eine steigende Anzahl von fluktuierend einspeisenden und auf erneuerbaren Energieträger basierenden Anlagen in die bestehenden Energiesysteme integrieren zu können, müssen die Energiesysteme nicht nur verstärkt, sondern grundlegend transformiert werden.

Die LoCA-Theorie bietet einen Greenfield-Ansatz zum Entwurf solcher Energiesysteme. Zentrales Element ist die Zelle. Bild 1 zeigt den Aufbau einer jeden Zelle. Sie besteht aus einer Verbindungseinheit (Port), einer Quelle (Source), einem Speicher (Storage), einem Konverter (Converter) und einem Verbraucher (Sink). Aus der hierarchischen Anordnung in mehreren Zellen in Bild 2 ergeben sich die Rollen, die jede Zelle je nach Betrachtungsebene einnimmt: Loop, Circle und Arc. Werden viele Zellen nach diesem Muster verknüpft, ergibt sich die fraktale Struktur wie in Bild 3. Die Zelle selbst besitzt eine Intelligenz, die Methoden zur Selbstorganisation bereitstellt und den Betrieb innerhalb der Zelle managt. Wie diese Steuerung umgesetzt werden kann, wurde in drei Ansätzen untersucht.

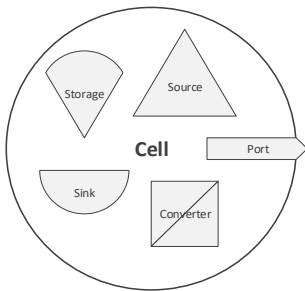


Bild 1: Aufbau einer Zelle

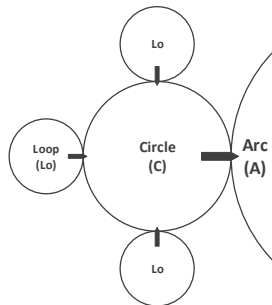


Bild 2: Loop, Circle und Arc

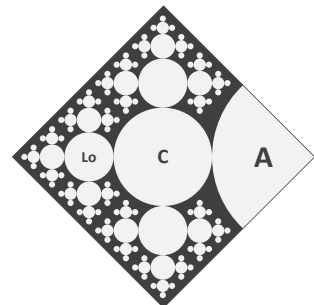


Bild 3: Fraktale Verknüpfung mehrerer Zellen

Künstliches neuronales Netz (KNN)

Eine Möglichkeit, den Energiefluss zwischen den Zellen zu steuern, stellen die KNN dar. Hierbei wird versucht, die Struktur eines Gehirns nachzuempfinden. [1] Neuronen werden dazu miteinander verbunden und die Verbindungen gewichtet. Aus allen Eingängen eines Neurons wird über eine Funktion ein normiertes Ausgangssignal generiert. Dieses Signal wird an die Neuronen einer tieferen Schicht weitergegeben. Am Ende wurden die Eingangsinformationen zu einem Endergebnis verarbeitet. Um von dem KNN die erwarteten Ergebnisse zu bekommen, muss es mit großen Datenmengen trainiert werden. Zwar konnten aus dem KNN relativ verlässlich gute Ergebnisse abgerufen werden, dies erfordert jedoch einen hohen Trainingsaufwand. Da am Beispiel der LoCA-Theorie lediglich mit einem sehr einfachen Modell gearbeitet wurde, ist der Einsatz eines KNN nicht zweckmäßig.

Zellularer Automat (ZA)

Mit Hilfe eines ZA [2] lässt sich die gegenseitige Beeinflussung von räumlich angeordneten Zellen abbilden. Im einfachsten Fall besitzt jede Zelle nur zwei Zustände. Im zeitlichen diskreten Verlauf können sich die Zustände ändern. Eine Zustandsänderung ist nur abhängig vom Zustand der betrachteten Zelle und die Zustände der direkten Nachbarn. Als Zustandsmerkmal wurde für die LoCA-Theorie der Füllstand der Energiespeicher der Zellen genutzt. In einer manuell festgelegten Anordnung von 13 Zellen auf drei Ebenen konnte gezeigt werden, wie Energie zwischen den benachbarten Zellen ausgetauscht wird, in Abhängigkeit der Speicherfüllstände.

Open Energy System Modelling Framework (oemof)

Das oemof wurde zur Modellierung und Analyse von Energieversorgungssystemen entwickelt. Es ist in Python implementiert und bietet eine umfangreiche Toolbox, um Energiesystemmodelle in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung zu erstellen. Die im Paket definierten Bausteine wurden genutzt, um eine einfache Anordnung mehrerer Zellen darzustellen. Leider konnten hier die erwarteten Energieflüsse nicht korrekt abgebildet werden. Da sich das oemof-Paket noch in einem relativ frühen Entwicklungsstadium befindet, ist es noch nicht möglich alle Parameter der integrierten Bausteine frei zu wählen. Dies führt dazu, dass der Speicherfüllstand einer Zelle am Ende einer Zeitreihe wieder seinen Startwert annehmen muss. Für folgende Versionen ist bereits ein Bugfix angekündigt.

[1] G. Rey, K. F. Wender. *Neuronale Netze*. Huber, 2010.

[2] H.G. Beckmann. *Zelluläre Automaten*. 2005.

[3] oemof developer group. *oemof - open energy modelling framework (v0.2.2)*. Zenodo, 2018.



Sebastian Krahmer, Dipl.-Ing.
Methoden der dynamischen
Netzreduktion – Anwendung zur
Untersuchung der transienten Stabilität
im Übertragungsnetz

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Transformation des Elektroenergiesystems ist allgegenwärtig. Zum einen wird dabei der Beitrag großer Synchrongeneratoren zu den Systemdienstleistungen Spannungs- und Frequenzhaltung durch den Beitrag dezentraler Erzeugungsanlagen (DEAs), insbesondere der Windenergieanlagen (WEAs), schrittweise substituiert. Zum anderen werden die dynamischen Eigenschaften der DEAs und ihre Fähigkeit zur statischen und dynamischen Netzstützung relevant für die Stabilität im Übertragungsnetz.

Die Untersuchung der transienten Stabilität im Übertragungsnetz erfolgt durch die Simulation von Störungen (z. B. 3-poliger Sammelschienenfehler) in dynamischen Netzmodellen, in denen die Verteilungsnetze üblicherweise durch vereinfachte Netzäquivalente abgebildet sind. Vor dem Hintergrund sich ändernder Erzeugungsstrukturen erfolgt daher ein Vergleich verschiedener Methoden der Netzreduktion hinsichtlich Genauigkeit in stationären und dynamischen Berechnungen und Praxistauglichkeit.

Nach aktuellem Stand reduzieren die Netzbetreiber die Verteilungsnetze mit Hilfe einer Erweiterung der WARD-Methode [1]. Dabei werden die klassischen WARD-Elemente, implementiert als statische Ersatzspannungsquellen, durch dynamische 110-kV-Ersatzknoten mit aggregierter Erzeugung und Last substituiert. Jeder Erzeugungstyp wird am Ersatzknoten zudem durch ein dynamisches Anlagenmodell abgebildet. Das Verfahren hat den Vorteil, dass der Zubau von DEAs einfach nachgeführt werden kann. Im Gegenzug ist der Aufwand zur Erstellung der reduzierten Netzäquivalente durch die individuelle Anpassung der WARD-Elemente hoch.

Eine alternative Verfahrensweise auf Grundlage der dynamischen Netzreduktion nach PODMORE [2] bietet den Vorteil, dass die statische Reduktion des Netzes von der dynamischen Reduktion der Erzeugungsanlagen (EZAs) und ihrer Knoten entkoppelt ist. Somit bleiben die dynamischen Eigenschaften der EZAs bei gleichzeitig geringem Anpassungsaufwand erhalten. Das angewandte dynamische Netzreduktionsverfahren erfolgt in fünf Schritten:

- 1) Unterteilung eines Netzes in ein Untersuchungsnetz und ein zu reduzierendes Netz,
- 2) Identifikation von Gruppen kohärenter Generatoren für bestimmte Fehler im Untersuchungsnetz,
- 3) Aggregation aller kohärenter Generatorknoten mit der REI-Methode nach DIMO [3], [4],
- 4) Reduzierung des passiven Netzes mit der Methode von WARD,
- 5) Aggregation der Gruppen kohärenter Generatoren zu äquivalenten Generatoren mit dynamischem Anlagenmodell.

Die vorgestellten Methoden wurden an zwei Netzen in DigSILENT PowerFactory implementiert. Zusätzlich zum New England 39-Bus-System [5] wurde als zweites Netz ein Modell eines realitätsnahen deutschen 110-kV-Netzes mit hoher Durchdringung an DEAs gewählt (vgl. Bild 1). Es erfolgte eine jeweilige Simulation auslegungsrelevanter Fehler für die typischen Betriebsfälle „Niedrige Auslastung“, „Starkwind-Starklast“ und „Hoher Transit“. Zur Bewertung der Reduktionsverfahren wurden die Verläufe der Knotenspannungen, der Spannungswinkel sowie der Wirk- und Blindströme mit denen des originalen Netzmodells verglichen. Das in Bild 1 dargestellte Verteilungsnetz hat eine installierte Erzeugungsleistung von 2.670 MW, von der rund 90 % den DEAs zuzuordnen ist. Hiervon werden allein 80 % von WEAs bereitgestellt. Dem gegenüber steht eine maximale Last von rund 375 MW. Bild 2 zeigt einen typischen Verlauf des Spannungsbetrages nach einem 3-poligen Kurzschluss an der 380-kV-Sammelschiene des UW 2.

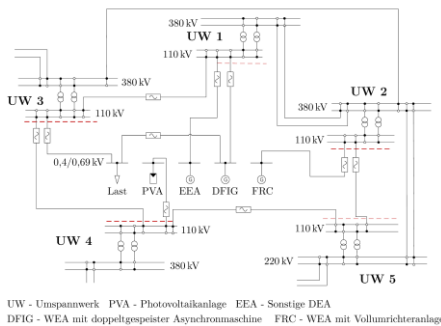


Bild 1: Schema des reduzierten 110-kV-Netzes auf Basis der Methode nach PODMORE

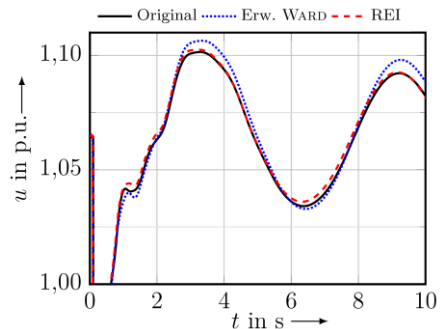


Bild 2: Verlauf der Spannung an der 380-kV-Sammelschiene des UW 3

Für stationäre und dynamische Berechnungen erzielen die hier beschriebenen Netzreduktionsverfahren sehr gute Genauigkeiten resp. Übereinstimmungen hinsichtlich des Kurvenverlaufs. Der Einsatz von 110-kV-Ersatzknoten bei der Erweiterung der WARD-Methode führt jedoch zu Abweichungen im Blindleistungsbedarf des reduzierten Netzes. Grundlage einer dynamischen Netzreduktion und damit maßgeblich für die praktische Umsetzbarkeit ist daher ein möglichst geringer Fehler im stationären Lastfluss des reduzierten Netzäquivalents. Die Methode nach PODMORE wird abschließend empfohlen.

- [1] J. B. Ward. *Equivalent Circuits for Power-Flow Studies*. In: Transactions of the American Institute of Electrical Engineers 68.1, Juli 1949.
- [2] R. Podmore. *A Comprehensive Program For Computing Coherency-Based Dynamic Equivalents*. In: IEEE Power Industry Computer Applications Conference (PICA), 1979.
- [3] P. Dima. *Nodal Analysis of Power Systems*. Hrsg. von Editura Academiei, Hrsg. von Abacus Press. Bukarest, Kent, 1975.
- [4] J. Stadler, H. Renner. *Application of Dynamic REI Reduction*. In: IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe 2013), Okt. 2013.
- [5] T. Athay, R. Podmore, S. Virmani. *A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability*. In: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems (PAS) 98.2, März 1979.



Marcus Kreutziger, Dipl.-Ing.
Blindleistungsmanagement dezentraler
Erzeugungsanlagen zur selektiven Span-
nungsoptimierung in 110-kV-
Verteilnetzen

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Der stetig steigende Anteil dezentraler Energieanlagen (DEA) an der Gesamtenergieerzeugung führt zu neuen Herausforderungen bezüglich der Beiträge zu Systemdienstleistungen. So wurden im Projekt SysDL 2.0 unterschiedliche Anwendungsfälle definiert um Blindleistung koordiniert bereitzustellen. Hierfür müssen geeignete Optimierungsalgorithmen identifiziert und weiterentwickelt werden. Dabei muss die Untersuchung unterschiedlicher Zielfunktionen und umfangreicher Randbedingungen erfolgen, um den Einsatz in einem realen Feldtest zu ermöglichen. Für folgende Anwendungsfälle wurde ein Algorithmenvergleich durchgeführt:

- Verlustminimierung mit konkreter Blindleistungsvorgabe an den Netzverknüpfungspunkten (NVPs)
- Maximale und minimale Blindleistungsbereitstellung an den NVPs

Für die Untersuchung wurden fünf Algorithmen anhand der in Bild 1 dargestellten Klassifizierung ausgewählt.

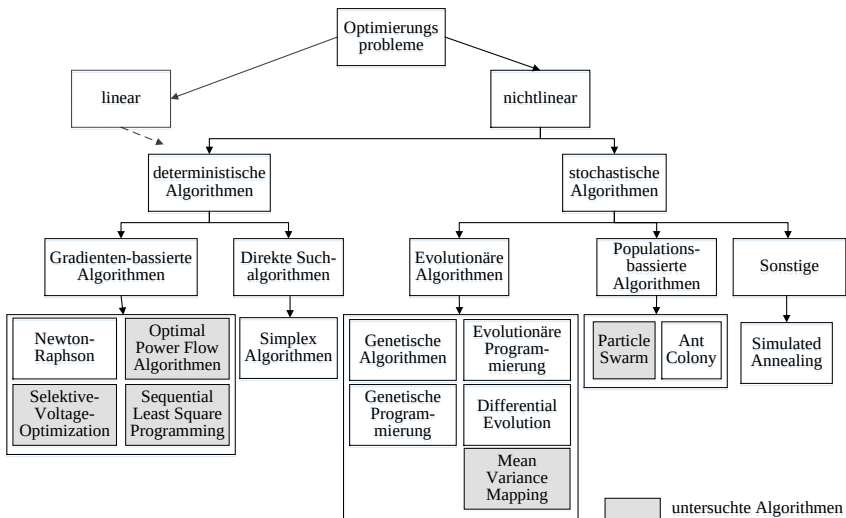


Bild 1: Klassifizierung der Algorithmen

Die Algorithmenstruktur der Selektive Voltage Optimization (SVO) wurde speziell auf die im Projekt geforderten Ziele und Randbedingungen erstellt. Die übrigen Algorithmen sind nach aktuellem Stand der Technik implementiert. Der Vergleich erfolgt an einem Testnetz, das eine einfache Verteilnetzstruktur aufweist und mit 48 regelbaren DEAs (CDG - Controlled Distributed Generators) die Skalierbarkeit der Optimierungen zeigen soll. Bild 2 stellt die Ergebnisse dar.

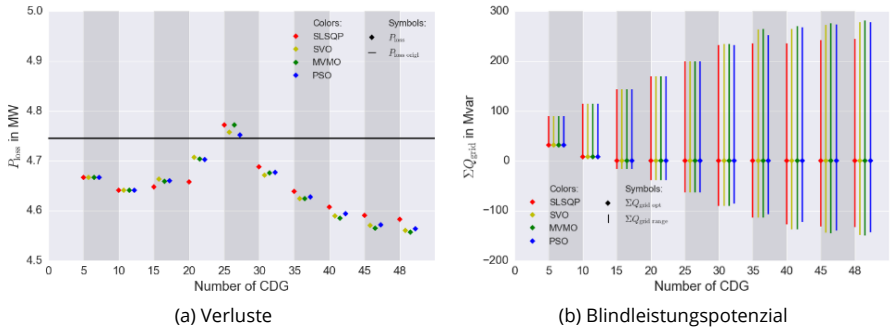


Bild 2: Optimierungsergebnisse der Anwendungsfälle für das Testnetz [1]

In Bild 2a ist das Verhalten der Verlustoptimierung dargestellt und kann in drei Abschnitte unterteilt werden. Beginnend mit wenigen CDGs kann zunächst eine Reduzierung der Verluste im Verteilnetz, durch einen verringerten Blindleistungsaustausch zum Übertragungsnetz erreicht werden (schwarze Linie). Um die Nebenbedingung $Q_{NVP} = 0$ zu erfüllen, wird mit steigender Anzahl an CDGs, ein zusätzlicher Blindleistungsfluss im Verteilnetz erzeugt und die Verluste steigen. Mit über 30 CDGs kann das verfügbare Blindleistungspotenzial genutzt werden, um die Verluste zu optimieren. Die besten Lösungen erreicht hierbei die MVMO, gefolgt von der SVO. Die Abweichung aller Algorithmen liegt jedoch innerhalb von einem Prozent.

Bild 2b zeigt den steigenden Blindleistungsstellbereich mit zunehmender Anzahl an CDGs. Jedoch flacht dieser mit einer hohen Anzahl an CDGs aufgrund von Netzrestriktion ab. Im Vergleich der Algorithmen ist zu erkennen, dass die MVMO die besten Lösungen findet, gefolgt von der SVO. Die übrigen Algorithmen haben teils Probleme den Rand des Lösungsraumes zu erreichen und zeigen geringere Blindleistungspotenziale auf.

Eines der Hauptkriterien für die Auswahl eines geeigneten Optimierungsalgorithmus ist die Berechnungszeit, welche große Unterschiede aufzeigt. Hier ist nur die SVO und der OPF mit Rechenzeiten im Sekundenbereich konkurrenzfähig.

Als Zusammenfassung aller Bewertungskriterien ist die SVO für eine praktische Implementierung am besten geeignet.

[1] M. Kreutziger et al. *Reactive power management of distributed generators for selective voltage optimization in 110-kV-subtransmission grids*. NEIS Conference 2018, Hamburg, 2018.

Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Power Quality“



Ana Maria Blanco, Dr.-Ing.
Impact of flat-top voltage waveform distortion on harmonic current emission and summation of electronic household appliances

Electronic household appliances are non-linear loads and emit harmonics into the low voltage networks. Usually, these loads are simply modelled by constant current source models, which only represent the harmonic emission of the appliances for a single supply voltage distortion, mostly sinusoidal conditions. Measurements have shown that the harmonic current emitted by electronic devices does not only depend on its circuit topology, but also on the existing supply voltage distortion.

The main aim of this research is to analyze the effect of different flat-top supply voltage distortion on the harmonic current emission of a representative selection of household electronic devices with different topologies. Voltage supply with a flattened top was used for this analysis, as this is the typical voltage distortion present in public low voltage networks. Fig. 1 shows the selected flat-top voltage waveforms, classified in three groups: Group 1 has approximately horizontal flat-top waveforms, group 2 has left-skewed flat-top waveforms, and group 3 has right-skewed flat-top waveforms. In all the cases, the THDu is below 5 %, which is well below the compatibility level for public low voltage networks specified in the standard IEC 61000-2-2.

Fig. 2 shows exemplarily the magnitude and phase angle variation of the third harmonic currents of a LED lamp with the different flat-top voltage waveforms. The change in the colors from light to dark indicates the direction in which the voltage distortion increases, i.e. the flat-top gets more pronounced (c.f. Fig. 1). In this case, the harmonic current increases with the voltage distortion. There is also a change in the phase angle of about 25° in the counterclockwise direction for the worst case.

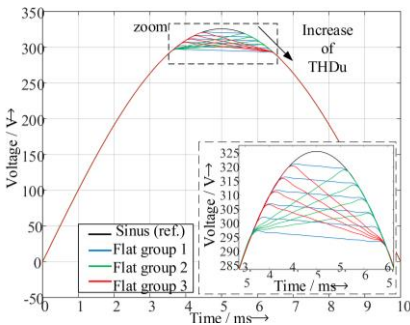


Fig. 1: Selected flat-top voltage waveforms

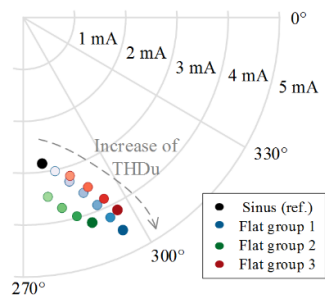


Fig. 2: Variation of the 3rd harmonic current for a LED lamp

Typical electronic appliances with switch mode power supplies without power factor correction (N-PFC), with passive PFC (P-PFC) and with active PFC (A-PFC) were selected for the analysis. In order to compare the behavior of all devices, the variation of magnitudes and phase angles with respect to the reference case (sinusoidal voltage waveform) is calculated. As each device has different input power, the harmonic currents are expressed as percentage of the fundamental current to facilitate the comparison. Fig. 3 shows the result of the comparison of the third harmonic, where the variation of the colors represents the variation of the voltage distortion for the as in Fig. 2.

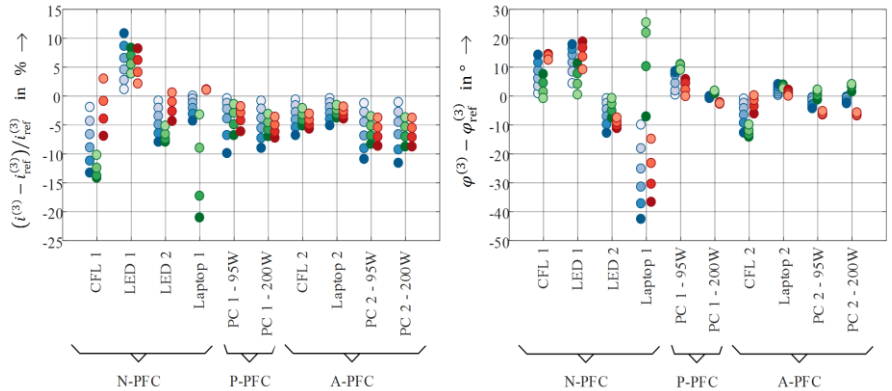


Fig. 3: Variation of 3rd harmonic magnitudes and phase angles with respect to the reference case.

The analysis has been performed for the first 15 odd harmonics and the following conclusions can be drawn. The different topologies do not show a unique behavior. With respect to the harmonic magnitudes, the N-PFC devices seem to be the most sensible, especially the laptop 1. There is not always a decrease of the harmonic currents with the increase of voltage distortion (attenuation). The harmonic phase angles show also significant variations, which increase with the harmonic order. Variations between 30° and 100° are observed in most of the cases and for most harmonics. A more detail discussion of the results of this study can be found in [1].

The variation of harmonic currents with the voltage distortion is mainly linked to the operation characteristic of the DC-link capacitor of the rectifier. The relation between the variation of voltage harmonic magnitudes and phase angles with the corresponding changes in the harmonic currents is not linear, and difficult to characterize. Finally, it can be concluded that the simple current source model is not recommended to represent the harmonic emission of electronic devices in harmonic studies. Moreover, revision of the respective standards should be considered, because most of them take only into account the harmonic current emission under ideal sinusoidal voltage conditions.

- [1] A. M. Blanco, M. Gupta, A. Gil De Castro, S. Rönnberg, J. Meyer. *Impact of flat-top voltage waveform distortion on harmonic current emission and summation of electronic household appliances*. In: International Conference on Renewable Energies and Power Quality, 2018.



Max Domagk, Dr.-Ing.
Verfahren zur Berechnung von
Oberschwingungsgrenzwerten für
Kundenanlagen im Niederspannungsnetz

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Verbesserung bestehender Verfahren zur Berechnung von Oberschwingungsgrenzwerten für Kundenanlagen im Niederspannungsnetz ist eines der Ziele im Rahmen des Projektes „NetzHarmonie“. Hierbei sollen vorhandene Aufnahmekapazitäten des Netzes hinsichtlich Oberschwingungen zum Anschluss von Windenergie- und Photovoltaikanlagen besser ausgenutzt werden. Gleichzeitig soll ein nachhaltig netzverträglicher Ausbau der Netze mit dezentraler Erzeugung gewährleistet sein.

Der Vergleich international relevanter Normen und Richtlinien zeigt, dass die berechneten Oberschwingungsgrenzwerte für Kundenanlagen in der Niederspannung stark streuen [1]. Die für Deutschland relevanten Verfahren (D-A-CH-CZ und VDE-AR-N 4105) liegen hierbei vergleichsweise zentral und weisen weder besonders hohe noch besonders niedrige Grenzwerte auf.

Bei der weiteren Analyse der Verfahren wurden diverse Inkonsistenzen bzw. Schwachstellen identifiziert. Es existieren bspw. eine Ungleichbehandlung für verschiedene Anlagentypen (Unterscheidung zwischen Abnehmern und Erzeugern) sowie Unterschiede bei den adressierten Frequenzbereichen für die Berechnung der Grenzwerte [2]. Die Aufteilung der zulässigen Störpegel wird je nach Philosophie des Verfahrens anschlusspunktbezogen oder netzweit koordiniert. Besonderheiten konkreter Anschlusspunkte wie z. B. mögliche Resonanzstellen oder niedrige X/R-Verhältnisse können nicht individuell berücksichtigt werden.

Basierend auf dem detaillierten Gleichungsansatz nach D-A-CH-CZ wurden Erweiterungen in Form zusätzlicher Parameter ergänzt, welche die flexiblere Berechnung realistischerer Grenzwerte ermöglichen:

$$I_v = \frac{1}{k_{XR}} \cdot \frac{1}{\sqrt[k_A + k_E + k_S]{k_A + k_E + k_S}} \cdot \frac{1}{k_v} \cdot \left(\frac{u_{v \max}^2}{v^2} \cdot \frac{S_{kSS}}{S_A} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{1}{u_k} \cdot \frac{1}{g} \cdot \frac{S_A}{S_{kSS}} \right)^{\frac{1}{\alpha_v}} \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{S_A}} \cdot I_A \quad (1)$$

Der Ansatz berücksichtigt u.a. die Gleichbehandlung unabhängig vom Anlagentyp sowie eine Vereinheitlichung des Frequenzbereiches. Eine Aufteilung der zulässigen Störpegel auf alle Anlagen erfolgt durch die Definition von Ausnutzungsfaktoren für Abnehmer, Erzeuger und Speicher (k_A , k_E und k_S).

Durch die Einführung weiterer Parameter kann individuellen Besonderheiten u. a. unterschiedlichen X/R-Verhältnissen (k_{XR}) Rechnung getragen werden. Die Einführung des Resonanzfaktors k_v ermöglicht die Berücksichtigung von Resonanzen im Verlauf der frequenzabhängigen Netzimpedanz für den betrachteten Netzanschlusspunkt. Beispielhaft ist ein gemessener Impedanzverlauf in Bild 1 für einen Netzanschlusspunkt im Niederspannungsnetz dargestellt. Dieser weist eine Resonanzstelle bei etwa 1300 Hz auf, welche deutlich von der vereinfachten Annahme einer Impedanzgeraden ($k_v = 1$) abweicht. Ein möglicher Ansatz zur Berücksichtigung der Resonanzstelle ist die Verwendung eines Resonanzbereiches, wie in Bild 1 eingezeichnet. Durch entsprechend gesetzte Werte des Resonanzfaktors kann ein solcher Bereich für die Berechnung der jeweiligen Grenzwerte durch Gleichung (1) realisiert werden.

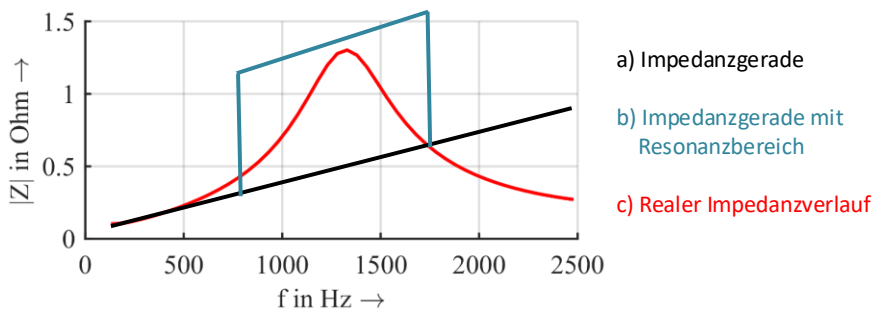


Bild 1: Darstellung der Impedanzgeraden (schwarz), eines real gemessenen Impedanzverlaufs (rot) und einer Impedanzgeraden mit Resonanzbereich (blau) für einen konkreten Anschlusspunkt

Die Validierung der genannten Erweiterungen in detaillierten Netzsimulationen führt zu einer besseren Ausnutzung der zulässigen Störeinträge im Vergleich mit den aktuell gültigen Verfahren. Durch Empfehlungen von Standardwerten für die neu eingeführten Parameter wird sichergestellt, dass sich die Anwendung des Verfahrens nicht verkompliziert und somit dessen Praxistauglichkeit garantiert ist.

- [1] M. Domagk, J. Meyer, M. Hoven, K. Malekian, F. Safargholi, K. Kuech. *Probabilistic Comparison of Methods for Calculating Harmonic Current Emission Limits*. 12th IEEE PES PowerTech Conference, Manchester, 2017.
- [2] J. Meyer, M. Domagk, L. Kirchner, K. Malekian, F. Safargholi, M. Hoven, K. Kuech. *Survey on international practice of calculating harmonic current emission limits*. 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Belo Horizonte, 2016.



Etienne Gasch, Dipl.-Ing.

Aggregated Power Quality Index for efficient analysis and visualization of Power Quality measurement campaigns

The importance of Power Quality (PQ) in distribution grids increases continuously. One of the reasons is the integration of new device technologies on a large scale, like photovoltaic (PV) inverters, the transition from incandescent to LED lamps or the integration of battery electric vehicles and smart distribution systems.

In order to allow a direct comparison of different PQ parameters the normalized individual Power Quality Index q is defined as

$$q_{i n t} = \left(1 - \frac{m_{i n t}}{g_n}\right) \cdot 100\%, \quad (1)$$

where m represents the measured value of PQ parameter n at site i and for observation interval t . The variable g corresponds to the limit of the PQ parameter n of the respective standard. The value q represents the remaining relative reserve between the measured value and the limit as percentage. A value of 100 % means perfect quality, a value of 0 % that the measured level is equal to the limit (no reserve). Negative values indicate that the limit is exceeded. In case EN 50160 is applied, m represents the 95th percentile of the 10-minute-values of one week, where the week corresponds to the observation interval t .

The methodology of aggregation of multiple individual indices q depends on the objective of the analysis and can follow different ways. In case a compliance assessment according to standards is required, the minimum of all indices q , which are going to be aggregated, is used ($APQI_{\min}$) [1]. In order to set priorities for different individual indices or aggregated indices, additional weighting factors are introduced. If desired, these factors can even differ between sites and time intervals. The general equation to calculate the $APQI_{\text{avg}}$ in the initial stage for a set of N individual indices at a specific site i and time interval t is given by:

$$APQI_{i t \text{ avg}} = \frac{\sum_{n=1}^N [w_{i n t} \cdot q_{i n t}]}{\sum_{n=1}^N w_{i n t}} \quad (2)$$

The weighting factors $w_{i n t}$ can be any positive value. If $w_{i n t} = 0$, the respective individual index is excluded from the analysis. In case no weighting shall be applied, all weighting factors have to be set to $w_{i n t} = 1$. For aggregating multiple site indices (further stages), the general calculation according to (2) can be applied but replacing q by $APQI_{\text{avg}}$.

In a case study the weighted and non-weighted $APQI_{\text{avg}}$ were calculated. To represent the spectrum of typical public distribution networks as best as possible, a set of 8 sites belonging to three consumer categories have been selected for the study. The respective consumer categories and used short codes are residential areas (R) with single-family houses and multifamily houses, commercial areas (C) with an electronic market, restaurants, shops, and offices and mixed areas (M).

The estimated performance of a single measurement site is illustrated in Fig. 1 for site R1. For each PQ phenomenon except unbalance (UNB) the non-weighted average of all phases and each week is calculated. The $APQI_{avg}$ of the site (first row) is calculated using (2), but also without weighting ($w_{int} = 1$). Each coloured box corresponds to one individual PQ index of one PQ parameter (phases aggregated where required) and one measurement week. The colours represent the $APQI_{avg}$. Weeks in which not enough valid data were recorded are left empty.

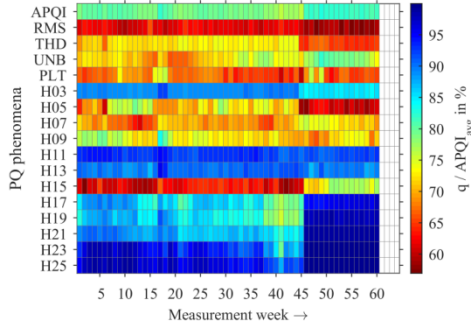


Fig. 1: Non-weighted $APQI_{avg}$ for all PQ phenomena of site R1

The non-weighted evaluation of multiple sites has been applied to all sites using exemplarily the PQ phenomena total harmonic distortion (THD), flicker (PLT) and UNB. The results are illustrated in Fig. 2 for each week and site. For the weighted power quality index harmonics (Hnn) are selected as highly important ($w = 0.68$), flicker as moderately important ($w = 0.27$) and UNB as less important ($w = 0.05$). The respective plot is shown in Fig. 3. In comparison with Fig. 2 the performance of site C2 improves significantly because voltage rms (RMS) is not considered, but it remains the worst performing site due to the high THD values.

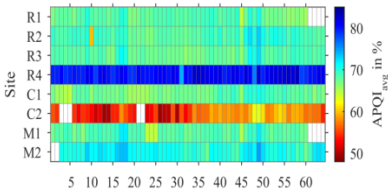


Fig. 2: Non-weighted $APQI_{avg}$ for sites: R1-M2 and PQ phenomena: THD, PLT, UNB and RMS

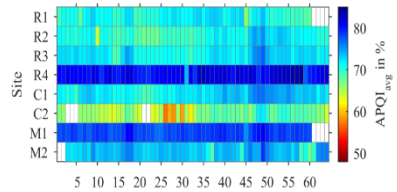


Fig. 3: Weighted $APQI_{avg}$ for sites: R1-M2 and PQ phenomena: THD ($w = 0.68$), PLT ($w = 0.27$), UNB ($w = 0.05$)

- [1] E.Gasch, M. Domagk, J. Meyer et al. *Assessment of Power Quality Performance in Distribution Networks Part I – Measurement Campaign and Initial Analysis*. 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2016.



Matthias Klatt, Dipl.-Ing.
Supraharmonische Resonanzen in
öffentlichen Niederspannungsnetzen

Die zunehmende Verbreitung hochfrequent schaltender, leistungselektronischer Geräte in öffentlichen Niederspannungsnetzen führt zu einer Zunahme der Spannungs- und Stromverzerrung im Frequenzbereich zwischen 2 und 150 kHz. Diese Anteile werden auch als Supraharmonische bezeichnet. Trotz intensiver, internationaler Forschungstätigkeit ist über die Ausbreitung von Supraharmonischen in Niederspannungsnetzen bisher wenig bekannt. Dies liegt unter anderem an dem deutlichen Einfluss der angeschlossenen Geräte auf die supraharmonischen Spannungen und Ströme, da diese meist mit zunehmender Frequenz niederohmiger werden, während die Impedanz des Netzes mit steigender Frequenz zunimmt. Aus diesem Grund ist die allgemein herrschende Annahme, dass die supraharmonischen Ströme von anderen Geräten, wie zum Beispiel Lampen, Computernetzteilen oder PV-Wechselrichtern, signifikant gedämpft werden und sich in der Regel noch in der gleichen oder in einer benachbarten Hausinstallation schließen. Dies führt zu der Annahme, dass die supraharmonische Spannung an der Quelle am höchsten ist, mit zunehmender Entfernung von der Quelle aus kontinuierlich abnimmt und an der Transformatorsammelschiene kaum noch nachweisbar ist.

In einem öffentlichen Niederspannungsnetz in Süddeutschland wurden Versuche durchgeführt, um diese Annahmen näher zu untersuchen. Das Niederspannungsnetz versorgt eine Siedlung mit Einfamilienhäusern und weist eine hohe Durchdringung mit Photovoltaik auf. Etwa jedes zweite Haus verfügt über eine Photovoltaikanlage. Das Netz wird einseitig gespeist und besteht aus mehreren Stickleitungen. Für die Messungen wurde eine Stickleitung mit Kabelverteilerschränken (KVS) am Anfang, Ende und in der Mitte ohne weitere Abzweigungen ausgewählt.

Das Bild 1 zeigt den vereinfachten Netzplan. Zur Messung der Ausbreitung der Supraharmonischen wird am KVS1 ein sinusförmiger Strom mit variabler Amplitude und

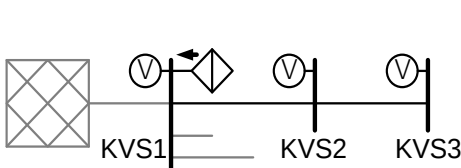


Bild 1: Vereinfachter Netzplan des Niederspannungsstrangs, mit Quelle und Messgeräten

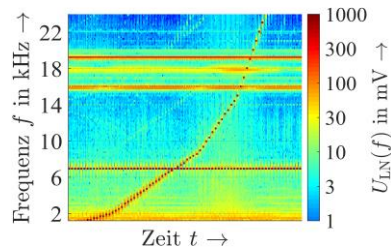


Bild 2: Spektrogramm der Leiter-Neutralleiter-Spannung am KVS1

Frequenz zwischen einem Leiter und dem Neutraleiter eingepreßt und die Spannung gemessen. Der Effektivwert des eingepreßten Stromes wurde so gewählt, dass er an der Schleifenimpedanz am KVS1 eine Spannung mit einem Effektivwert von rund 1 V verursacht. Erfahrungsgemäß ist bei dieser Spannungshöhe eine genaue Messung möglich, ohne dabei Störungen von Geräten in der Nachbarschaft zu verursachen. Das Bild 2 zeigt das Spektrogramm der Spannung am KVS1 während der Messung, welches drei wesentliche Bestandteile enthält:

1. Die von der Quelle hervorgerufene Spannung mit zunehmender Frequenz für die Ausbreitungsmessung.
2. Ein zusätzlich eingepreßtes 7 kHz-Pilotsignal zur Synchronisierung der Auswertintervalle für die Messungen an den drei KVS.
3. Von PV-Wechselrichtern verursachte, unbeabsichtigte Emission bei 16 und 19 kHz.

Die Spannungsmessung für die jeweils eingepreßte Frequenz erfolgt entsprechend Bild 1 gleichzeitig, dreiphasig an den drei KVS, synchronisiert über das Pilotsignal. Im Bild 3 ist der Verlauf der Leiter-Neutraleiter-Spannungen an den drei KVS dargestellt. Darin ist erkennbar, dass bis etwa 1 kHz die Spannung an allen drei Knoten praktisch identisch ist. Zwischen 2 und 8 kHz ist die Spannung an den Knoten KVS2 und KVS3 deutlich größer als am KVS1, in den der Strom eingepreßt wurde. Bei etwa 4 kHz und 7 kHz befinden sich Maxima, welche eine Überhöhung um den Faktor 1,8 erreichen. Oberhalb von 9 kHz wird die Spannung an den KVS2 und KVS3 kleiner als an der Einspeisestelle. Oberhalb von 20 kHz ist die Spannung an KVS2 und KVS3 sehr gering und ab 25 kHz im Hintergrundrauschen nicht mehr feststellbar.

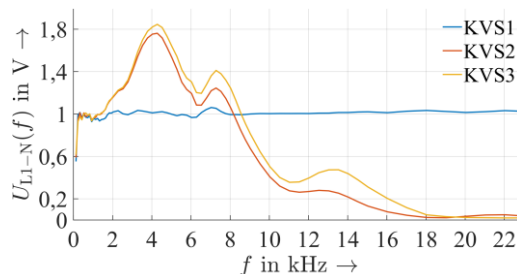


Bild 3: Leiter-Neutraleiter-Spannungen an den drei Kabelverteilerschrank in Abhängigkeit von der Frequenz des eingepreßten Stromes

Dieses Ergebnis zeigt, dass Resonanzen auch im Frequenzbereich zwischen 2 und 150 kHz auftreten und deutliche Verstärkungen der Spannungsverzerrung hervorrufen können. Die bisherige Annahme, dass supraharmische Spannungen ihren höchsten Wert stets direkt an der verursachenden Quelle haben, muss demzufolge in Frage gestellt werden. Dies sollte auch bei der zukünftigen Festlegung von Grenzwerten für die Störaussendung von Geräten im Frequenzbereich zwischen 2 und 150 kHz berücksichtigt werden, um mögliche Gerätestörungen in der elektrischen Umgebung von beabsichtigt bzw. unbeabsichtigt emittierenden Geräten weitestgehend zu vermeiden.



Jan Meyer, Dr.-Ing. Vergleich von Messmethoden für den Frequenzbereich 2-150 kHz

Im Rahmen der Verträglichkeitsnormung wurden im Mai 2018 Verträglichkeitspegel für den Frequenzbereich 2 – 150 kHz festgelegt. Als Messverfahren wird dabei das Verfahren nach CISPR 16-2-1 referenziert, welches jedoch für den Nachweis der Einhaltung von Grenzwerten im Labor an einer Netznachbildung entwickelt wurde und dessen Anwendungsbereich sich auf Emissionen im Frequenzbereich oberhalb 9 kHz beschränkt. Es besteht ein dringender Bedarf, die aktuellen Pegel im Netz messtechnisch zu erfassen und mit den Verträglichkeitspegeln vergleichen zu können. Allerdings existiert bisher noch kein entsprechendes genormtes Messverfahren. Die relevante Norm IEC 61000-4-30 Ed.3 beschreibt verschiedene Messverfahren lediglich in einem informativen Anhang. Um den Bedürfnissen der Netzbetreiber zu entsprechen, haben im Laufe der letzten Jahre verschiedene Hersteller ihre Messgeräte bereits um die Messung im Frequenzbereich 2-150 kHz erweitert. Dabei wurden jedoch verschiedene Verfahren implementiert, so dass die Messergebnisse von verschiedenen Geräten nicht vergleichbar sind.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen einer Forschungsarbeit [1] ein Vergleich verschiedener Messverfahren durchgeführt. Grundsätzlich werden zwei verschiedene Messmethoden unterschieden: Messmethoden im Frequenzbereich auf Basis der Frequenzmischung (Bild 1) und Messmethoden im Zeitbereich auf Basis der Fouriertransformation (Bild 2).



Bild 1: Messmethode auf Basis der Frequenzmischung (CISPR 16-2-1)



Bild 2: Messmethode auf Basis der Fourier-Transformation (IEC 61000-4-30 Ed.3)

Die Methode auf Basis der Frequenzmischung ist in CISPR 16-2-1 definiert (nachfolgend Methode A) und basiert auf Bandpassfiltern mit einer Breite von 200 Hz, deren Mittenfrequenz um jeweils 50 Hz versetzt sind (Frequenzauflösung von 50 Hz). Ausgewertet werden Intervalle von einer Länge von 20 ms, welche um jeweils 5 ms versetzt sind (Zeitauflösung von 5 ms). Die Bewertung erfolgt mittels Quasi-Peak-Detektor. Dieses Verfahren stellt durch die hohe Zahl paralleler Verarbeitungspfade hohe Anforderungen an die Rechenleistung. Für die Methode auf Basis der Fourier-Transformation existieren zwei verschiedene Varianten. Das erste Verfahren (nachfolgend Methode B) beansprucht die geringste Rechenleistung.

tung und geht von der Abtastung von jeweils 32, über 10 Netzperioden möglichst gleichverteilten Intervallen von $500\text{ }\mu\text{s}$ Dauer aus. Die 32 daraus resultierenden Spektren mit 2-kHz-Auflösung werden durch Effektivwertbildung je Spektralkomponente zusammengefasst. Dadurch ergibt sich eine Zeitauflösung von 10 Netzperioden und eine Frequenzauflösung von 2 kHz. Das Verfahren ist mit lediglich 8 % Signalabdeckung nicht lückenlos. Das zweite Verfahren (nachfolgend Methode C) tastet die Zeitverläufe lückenlos ab und führt eine Fourier-Transformation über Intervalle von jeweils 200 ms durch. Das sich so ergebende Spektrum mit 5-Hz-Auflösung wird zu 200-Hz-Bändern zusammengefasst. Die Frequenzauflösung entspricht somit 200 Hz, die Zeitauflösung 200 ms. Im Gegensatz zum Verfahren nach CISPR weisen die Verfahren auf Basis der Fourier-Transformation keine Überlappungen in Zeit und Frequenz auf.

Alle drei Verfahren wurden auf Basis verschiedener synthetischer und real gemessener Signale umfassend miteinander verglichen. Beispielhaft zeigen Bild 3 und Bild 4 den Vergleich für eine LED-Lampe und einen Photovoltaik-Wechselrichter.

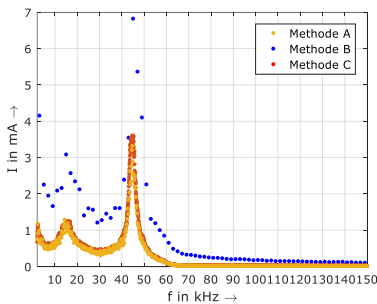


Bild 3: LED-Lampe im Labor

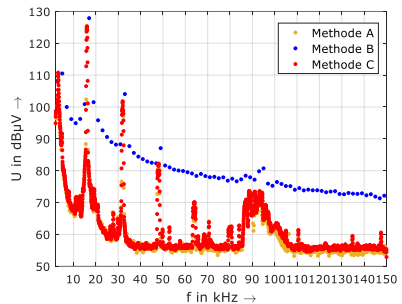


Bild 4: Photovoltaik-Wechselrichter im Feld

Methode A: CISPR 16-2-1

Methode B: IEC 61000-4-30 (2-kHz-Spektren)

Methode C: IEC 61000-4-30 (200-Hz-Spektren)

Methode A und C führen in den meisten Fällen zu vergleichbaren Ergebnissen. Methode B zeigt aufgrund der niedrigeren Frequenzauflösung jedoch teilweise erhebliche Abweichungen gegenüber den anderen Methoden. Außerdem ist aufgrund der Lücken bei der Erfassung auch die Reproduzierbarkeit von Methode B begrenzt. Demgegenüber können jedoch Schwankungen der Emission innerhalb einer Netzperiode durch Methode B besser abgebildet werden, da das Auswerteintervall von Methode A und C mindestens einer oder mehreren Netzperioden entspricht.

Die identifizierten Unterschiede zwischen den Verfahren unterstreichen die zwingende Notwendigkeit der Definition eines verbindlichen Verfahrens für Netzmessungen im Frequenzbereich 2-150 kHz, an welchem bei IEC SC77A WG9 gearbeitet wird.

[1] A. Grevener. *Evaluation of measurement methods for the frequency range 2 - 150 kHz*. Diplomarbeit 05/2018, TU Dresden, IEH.



Friedemann Möller, Dipl.-Ing.
Berechnung von Unsymmetriegrenzwerten
für Kundenanlagen im
Mittelspannungsnetz

Durch die Zunahme unsymmetrisch betriebener Kundenanlagen mit langen Nutzungsdauern in öffentlichen Verteilungsnetzen ist mit einer Erhöhung der Spannungsunsymmetrie in den betroffenen Netzen zu rechnen. Um den Beitrag einzelner Kundenanlagen auf die Spannungsunsymmetrie zu begrenzen, wird empfohlen, Grenzwerte für den Gegensystemstrom der Anlage vorzugeben. Im Zuge der Überarbeitung der Technischen Regeln zur Beurteilung von Netzzrückwirkungen [1] erfolgt die Berechnung eines Grenzwertes nach folgender Gleichung.

$$I_{2A} = \frac{s}{1000} \cdot \frac{1}{\sqrt{k_E + k_B + k_S}} \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{S_A}} \cdot I_A \quad (1)$$

Wobei für den Proportionalitätsfaktor s gilt

$$s = \sqrt{1 - k_{NMS}} \frac{k_{uSS} \cdot G_{uMS}}{\sqrt{u_k}} \cdot 1000 \quad (2)$$

Mit:

s	Proportionalitätsfaktor	S_{kV}	Kurzschlussleistung
k_E	Erzeugungsfaktor	I_A	Vereinbarer Anlagenstrom
k_B	Bezugsfaktor	k_{NMS}	Für das MS-Netz reservierter Anteil am zulässigen Gesamtstöreintrag
k_S	Speicherfaktor	k_{uSS}	Reduktionsfaktor
S_A	Vereinbarte Anlagenleistung	G_{uMS}	Zulässiger Gesamtstöreintrag im MS-Netz

Die in Gleichung (2) angegebenen Parameter sind i. A. bekannt bzw. werden vom Netzbetreiber vorgegeben. Einzig der Reduktionsfaktor k_{uSS} ist zu berechnen. Bei Nutzung der Analogie zwischen Mittel- und Niederspannungsnetzen (einseitig gespeister Halbring bzw. Strahlennetz) kann die in [2] gegebene Berechnungsvorschrift genutzt werden. Dabei ist die Berechnung für k_{uSS} nach jedem Anschluss einer weiteren Kundenanlage zu wiederholen. Um den Berechnungsaufwand zu reduzieren, ist es zielführend, Anhaltswerte für k_{uSS} bzw. s in Abhängigkeit der Netzstruktur vorzugeben. Dazu wurden für Mittelspannungsnetze mit einer Nennspannung von 10 kV, 20 kV und 30 kV, auf Grundlage der in [3] vorgestellten Referenznetze, je 10000 Simulationsnetze erstellt und die entsprechenden Reduktionsfaktoren bestimmt. Bild 1 zeigt das Schema zur Erstellung der Eingangsdaten für die entsprechenden Simulationsnetze. Die Untersuchung der Korrelation zwischen k_{uSS} und diversen Netzparametern zeigt, dass neben der Nennspannung die minimale Kurzschlussleistung $S_{kV \min}$ im Netz die höchste Korrelation zu k_{uSS} aufweist. Bild 2 zeigt exemplarisch die Ergebnisse für eine Nennspannung von 20 kV.

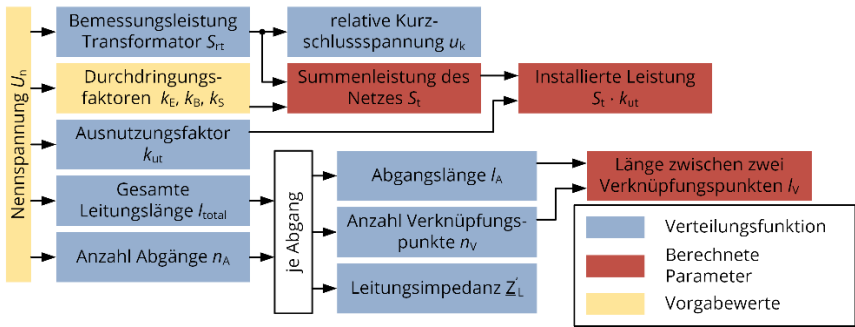


Bild 1: Schema zur Bestimmung der Parameter von Simulationsnetzen

Zur Verifikation der Ergebnisse wurde eine Umfrage unter Netzbetreibern in Deutschland, Österreich, Tschechien und der Schweiz durchgeführt und auf Grundlage der erhaltenen Netzparameter Reduktionsfaktoren für reale Netze berechnet. Bild 3 zeigt den Vergleich zwischen Simulation (Approximation) und den Daten der realen Netze. Da die Approximation in den meisten Fällen konservativere Werte für k_{uSS} liefert, kann k_{uSS} für eine vereinfachte, handhabbare Grenzwertabschätzung über $S_{kV \min}$ abgeschätzt werden.

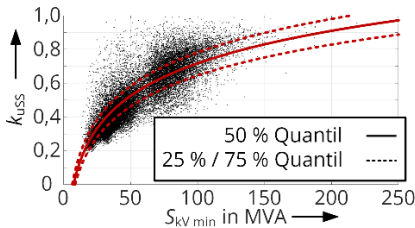
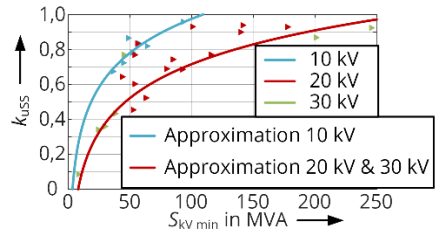


Bild 2: Simulationsergebnisse zur Bestimmung des Reduktionsfaktors in Abhängigkeit der minimalen Kurzschlussleistung

Bild 3: Vergleich des simulierten Zusammenhangs zwischen k_{uSS} und $S_{kV \min}$ mit realen Mittelspannungsnetzen

Der nach Gleichung (1) berechnete Grenzwert kann u. U. unverhältnismäßig klein sein, so dass jeder Anlage im Netz einen Beitrag von min. 0,2 % zur Spannungsunsymmetrie zugestanden werden sollte. So dass gilt

$$I_{2A} = \frac{1}{500} \cdot \frac{S_{kV}}{\sqrt{3} \cdot U_n} \quad (3)$$

- [1] D-A-CH-CZ: *Technische Regeln zur Beurteilung von Netzurückwirkungen* (2. Ausgabe). 2007.
- [2] IEC TR 61000-3-14:2011: *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3- 14: Assessment of emission limits for harmonics, interharmonics, voltage fluctuations and unbalance for the connection of disturbing installations to LV power systems*. 2011.
- [3] K. Malekian, F. Safargholi, K. Küch, M. Domagk, J. Meyer, M. Hoven. *Characteristic Parameters and Reference Networks of German Distribution Grid (LV, MV, and HV) for Power System Studies*. International ETG Congress 2017, Bonn, Germany, 2017.



Sascha Müller, Dipl.-Ing.
**Einfluss der Netzimpedanz auf die
Oberschwingungsemission von PV-
Wechselrichtern**

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Für die Durchführung von Studien zu Oberschwingungspegeln im Netz sind detaillierte Modelle der Erzeugungs- und Abnehmeranlagen erforderlich. Bestandteil dieser Modelle ist jedoch nicht nur die Oberschwingungsquelle, welche die Emission des Gerätes selbst darstellt, sondern auch eine Impedanz. Diese bildet einen Ausbreitungspfad (Senke) für die Emission von anderen im Netz angeschlossenen Geräten. Insofern haben die Geräteimpedanzen auch einen Einfluss auf die an einem bestimmten Anschlusspunkt wirksame Impedanz, welcher für ein dort anzuschließendes Gerät die Netzimpedanz darstellt. Für verschiedene Anwendungen, u. a. zur Berechnung von Emissionsgrenzwerten, wird diese (frequenzabhängige) Netzimpedanz vereinfacht durch eine Impedanzgerade, basierend auf der Kurzschlussleistung des Netzes, repräsentiert. Unberücksichtigt bleiben bei diesem Ansatz insbesondere Resonanzerscheinungen, die aufgrund des häufig kapazitiven Charakters der Geräteimpedanz entstehen und zu einer Überhöhung von Oberschwingungspegeln führen können. Für eine möglichst genaue Vorhersage der zu erwartenden Pegel am Anschlusspunkt eines Gerätes sind daher Kenntnisse über die entsprechende Geräteimpedanz und die wirksame Netzimpedanz erforderlich.

Labormessungen von verschiedenen PV-Wechselrichtern an einer Netznachbildung [1] haben gezeigt, dass eine zwischen Spannungsquelle und Wechselrichter geschaltete Netzimpedanz bei unverzerrter Quellenspannung nur einen geringen Einfluss auf die emittierten Oberschwingungsströme hat. Der Grund dafür ist, dass in diesem Fall nur der angeschlossene PV-Wechselrichter Quelle der Oberschwingungen ist. Dessen Oberschwingungsströme sind am idealen Netz sehr klein, insbesondere für höhere Ordnungen. Ein reales Netz besitzt jedoch eine Spannungsvorverzerrung, welche als zusätzliche Oberschwingungsquelle wirkt. In Abhängigkeit der sich aus der Reihenschaltung von Netzimpedanz und Geräteimpedanz ergebenden Gesamtimpedanz kann diese Quelle einen Oberschwingungsstrom verursachen, welcher deutlich größer als die vom Gerät selbst erzeugten Oberschwingungen sein kann.

Um dies näher zu untersuchen, werden die frequenzabhängigen Eingangsimpedanzen der einzelnen PV-Wechselrichter sowie die resultierende frequenzabhängige Gesamtimpedanz der Reihenschaltung (PV-Wechselrichter mit Netzimpedanz) im Labor gemessen. Zur beispielhaften Veranschaulichung des Einflusses der Netzimpedanz wird diese als Impedanzgeraden basierend auf der Flickerreferenzimpedanz (Reihenschaltung aus R und X) nachgebildet. Um bei einer konstanten Spannungsvorverzerrung einfacher auf den resultierenden Oberschwingungsstrom schließen zu können, wird im Folgenden anstelle der Impedanz ihr Kehrwert, die Admittanz, verwendet.

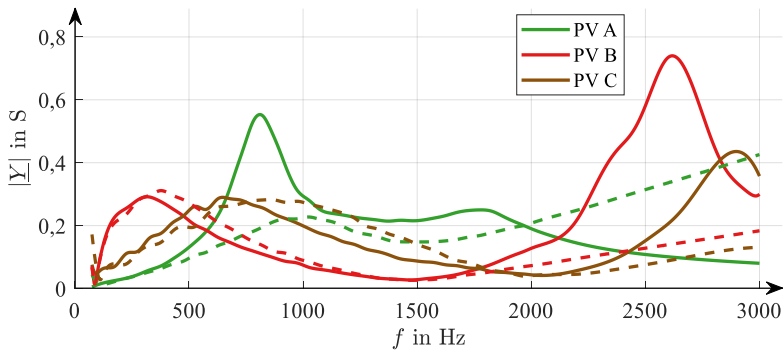


Bild 1: Betragsfrequenzgänge der Admittanz der PV-Wechselrichter (gestrichelte Kurven) und ihrer Reihenschaltung mit der Flickerreferenzimpedanz (durchgezogene Kurven)

Bild 1 zeigt die Betragsfrequenzgänge der resultierenden Admittanzen für drei verschiedene PV-Wechselrichter, jeweils mit und ohne die Reihenschaltung der Netzimpedanz.

Die dargestellten Admittanzfrequenzgänge sind ein direktes Maß für die Höhe des Oberschwingungsstroms bei vorhandener Vorverzerrung des speisenden Netzes. Je höher die aus der Reihenschaltung resultierende Admittanz ist, desto größer ist der Oberschwingungsstrom bei gleicher Oberschwingungsspannung. Besonders kritisch sind somit die Maxima im Betragsfrequenzgang der Admittanz. Das Bild zeigt, dass es gegenüber einem idealen Netz ohne Impedanz (gestrichelte Kurven) eine deutliche Änderung der Lage und teilweise auch der Höhe dieser Maxima gibt. Diese Änderungen im Frequenzgang hängen stark vom Verhältnis von Netz- zu Geräteimpedanz ab und können somit aufgrund der hohen Diversität realer Netzimpedanzkurven nicht allgemeingültig vorhergesagt werden. Ein Maximum der resultierenden Admittanz, d. h. eine Reihenresonanz, tritt genau dann auf, wenn die Beträge von Netz- und Geräteimpedanz näherungsweise gleich groß und deren Phasenwinkel entgegengesetzt sind. In diesem Fall erreichen sowohl der Oberschwingungsstrom als auch die Oberschwingungsspannung am Anschlusspunkt des PV-Wechselrichters hohe Werte.

Eine Möglichkeit, solche unerwünschten Resonanzen zu vermeiden, wäre die Ergänzung von Grenzwerten für Oberschwingungsströme durch geeignete Vorgaben zur Charakteristik der Eingangsimpedanz von Geräten und Anlagen.

- [1] F. Ackermann, S. Müller et al. *Characterization of Harmonic Emission of Individual Wind Turbines and PV inverters based on measurements Part I – Photovoltaic Inverters*. Solar Integration Workshop, Wien, 2016.



Morteza Pourarab, M.Sc.

Impact of variations in the utility side on the harmonic contribution of customer installations

In recent years, utilities have shown an increased interest in continuous assessment of harmonic contribution from customer installation. Accordingly questions have been raised about the impact of utility-side variations on customer harmonic contribution. In other words, how much independent is the customer contribution from the variations in the utility-side? For this reason, the voltage harmonic vector (VHV) method and IEC approach as the main common methods for harmonic contribution allocation are investigated. The methods require voltage and current harmonic phasors at the PCC as well as frequency characteristics of the impedances. When the exact values of these impedances are not available, reference impedances of the utility and customer side can be considered. In this study, both true and reference impedance values has been examined.

Variations in the utility side include changes in background voltage distortion ($\underline{U}_{bg}^{(h)}$) and/or harmonic impedance ($\underline{Z}_U^{(h)}$). System reconfiguration, reactive compensation and other customer installations affect the utility harmonic impedance as well as the voltage distortion. In addition, shunt capacitor banks in the utility-side and cables have the potential for low-order resonances. For the investigation laboratory measurements have been carried out using a PV inverter (PVI) and two types of utility impedances (cases A and B). Fig. 1 shows the scheme of the laboratory setup. Frequency characteristics of the two types of utility impedances are shown in Fig. 2. A shunt capacitor bank in case B introduces a parallel resonance at around 400 Hz. This resonance results in a significant deviation between the true and reference impedance of the utility side.

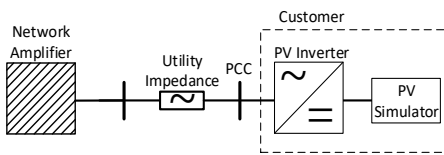


Fig. 1: Scheme of laboratory setup

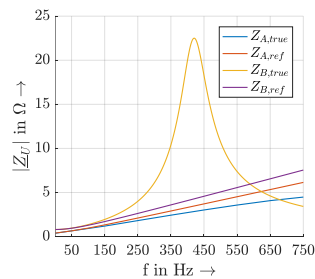


Fig. 2: Frequency characteristics of utility impedance

Customer contribution indices (i. e. $U_{em VHV}^{(h)}$ and $U_{em IEC}^{(h)}$ based on VHV and IEC methods, respectively) are calculated and shown in Table 1 for both cases. As can be seen, harmonic

voltages at PCC ($\underline{U}_{PCC}^{(h)}$) changed from case A to case B which are due to the different characteristics of the utility harmonic impedances. However, it is expected that the customer (PV inverter) contribution remains constant. Results show that customer contribution based on “reference impedances” is more robust.

Table 1: results of customer contribution under variation of utility impedance

Har- monic order (h)	CASE A					CASE B				
	$U_{em\ VHV}^{(h)}$		$U_{em\ IEC}^{(h)}$		$ \underline{U}_{PCC}^{(h)} $	$U_{em\ VHV}^{(h)}$		$U_{em\ IEC}^{(h)}$		$ \underline{U}_{PCC}^{(h)} $
	true	ref.	true	ref.		true	ref.	true	ref.	
5	1.05	1.19	0.76	0.88	7.82	2.99	2.00	2.16	1.42	11.56
7	1.32	1.39	0.89	1.06	6.88	9.11	3.46	6.73	2.32	15.72
9	0.63	0.67	0.43	0.53	2.27	0.00	0.95	0.00	0.65	3.48
11	1.69	1.65	1.10	1.39	5.34	0.00	1.16	0.00	1.00	3.79

In order to investigate the impact of background distortion variations, the PV inverter is examined under uniform variations of the magnitude and phase angle of the voltage distortion. 36 samples for each harmonic order were measured and the corresponding contribution indices have been calculated for each step. Fig. 3 and 4 exemplarily illustrate ranges of the customer contribution indices at 7th harmonic (i. e. $U_{em\ VHV}^{(7)}$ and $U_{em\ IEC}^{(7)}$). As the figures show, the indices are more sensitive to the phase angle of the background voltage distortion than the magnitude. Moreover, the IEC method gives more robust results than the VHV method.

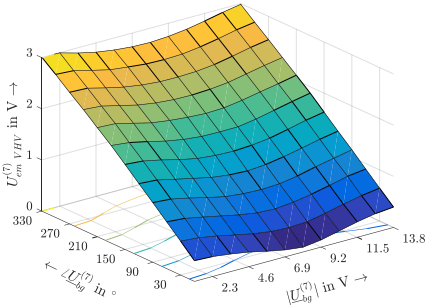


Fig. 3: Impact of background distortion variations on $U_{em\ VHV}^{(7)}$

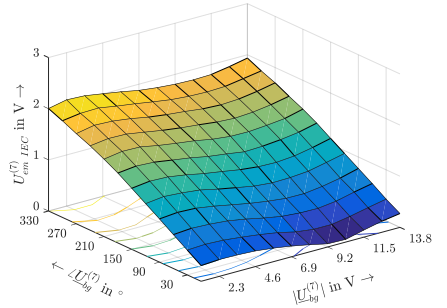


Fig. 4: Impact of background distortion variations on $U_{em\ IEC}^{(7)}$

In general, this study has shown that variations in the utility side can significantly affect the customer emission even for the case reference impedances are used on utility and customer side. The results indicate that further studies in this field are required to propose fair and reasonable indices for determining customer share of emission.

- [1] M. Pourarab, J. Meyer, A. Spelko, I. Papic. *Impact of variations in the utility side on the harmonic contribution of customer installations*. IEEE PES General Meeting, Portland, OR, USA, August 5-9, 2018.



Robert Stiegler, Dipl.-Ing.
Nichtinvasive Messung des
frequenzabhängigen
Übertragungsverhaltens von
Spannungswandlern

Für die Bewertung der Spannungsqualität in Verteilungs- und Übertragungsnetzen ist die genaue Messung von harmonischen und zwischenharmonischen Spannungen unerlässlich. Für Spannungen größer 1 kV werden hierfür oftmals Spannungswandler verwendet, deren Frequenzübertragungsverhalten durch Resonanzstellen geprägt ist, welche zu erheblichen Ungenauigkeiten führen können. Zuverlässige Oberschwingungsmessungen sind deshalb nur bei Kenntnis des frequenzabhängigen Übertragungsverhaltens möglich. Soll dieses durch invasive Messung bestimmt werden, muss der Spannungswandler freigeschaltet und vom restlichen System isoliert werden, was betrieblich einen großen Aufwand darstellt. Um diesen Aufwand zu vermeiden, wurde eine Methodik entwickelt, das frequenzabhängige Übertragungsverhalten von Spannungswandlern nichtinvasiv im Feld durch Ausnutzung der natürlich vorhandenen Verzerrung der Netzspannung zu ermitteln [1].

Für die nichtinvasive Messung wird eine zeitgleiche Messung der Sekundärspannungen des zu untersuchenden Wandlers sowie eines Referenzwandlers (z. B. RC-Teiler) durchgeführt. Der Referenzwandler ist primärseitig an die gleiche Spannung wie der zu untersuchende Wandler anzuschließen und sein frequenzabhängiges Übertragungsverhalten muss bekannt sein. Für das hier vorgestellte Beispiel wurden die Sekundärspannungen von je drei induktiven Wandlern und RC-Teilern in einem 110 kV-Netz (L1, L2, L3) über 23 Stunden aufgezeichnet.

Im ersten Schritt werden die aufgezeichneten Verläufe in den Frequenzbereich überführt. Dazu wird die diskrete Fourier-Transformation (DFT) auf die aufgezeichneten Zeitverläufe angewendet. Durch eine ausreichend lange Messdauer kann der Signal zu Rauschabstand (SNR) der Messung deutlich verbessert werden.

Die normierte Übertragungsfunktion $\underline{G}(f)$ eines Spannungswandlers wird nach (1) definiert.

$$\underline{G}(f) = \frac{\underline{U}_s(f)}{\underline{U}_p(f)} \cdot \frac{\underline{U}_{pr}}{\underline{U}_{sr}} \quad (1)$$

Der Betragsfehler eines Spannungswandlers gemäß Definition in IEC 61869-3 lässt sich aus der normierten Übertragungsfunktion ableiten (2).

$$\varepsilon_U(f) = \left| \frac{\underline{U}_s(f)}{\underline{U}_p(f)} \right| \cdot \frac{\underline{U}_{pr}}{\underline{U}_{sr}} - 1 = |\underline{G}(f)| - 1 \quad (2)$$

Da die Bemessungsgrößen U_{pr} und U_{sr} für den untersuchten Wandler und den RC-Teiler gleich sind, ergibt sich die Berechnungsformel zur Bestimmung der frequenzabhängigen Übertragungsfunktion des untersuchten Wandlers X bei bekanntem Übertragungsverhalten des RC-Teilers nach (3).

$$\underline{G}_X(f) = \frac{\underline{U}_S X(f)}{\underline{U}_S R_C(f)} \cdot \underline{G}_{RC}(f) \quad (3)$$

Da die Bestimmung des frequenzabhängigen Übertragungsverhaltens aus einer einzelnen Messung zu stark von Messrauschen beeinflusst ist, wird dieses unter Verwendung aller Einzelmessungen mittels Regressionsanalyse bestimmt. In Bild 1 ist das Beispiel für die Bestimmung des Betragsfehlers für 2,3 kHz dargestellt. Die Beträge der Frequenzkomponenten gemessen mit dem induktiven Spannungswandler sind über den Werten gemessen mit dem RC-Teiler dargestellt. Im Idealfall liegen alle Punkte auf einer Geraden. Der Anstieg der Geraden wird mittels linearer Regression (rote Linie) bestimmt. Der Anstieg entspricht dem Betrag der kombinierten Übertragungsfunktion von RC-Teiler und induktivem Spannungswandler. In diesem Beispiel hat die Gerade einen Anstieg von 1,912, was bei der Annahme eines idealen Übertragungsverhaltens des RC-Teilers einem Betragsfehler des Spannungswandlers von $\varepsilon_U(2,3 \text{ kHz}) = 91,2 \%$ entspricht.

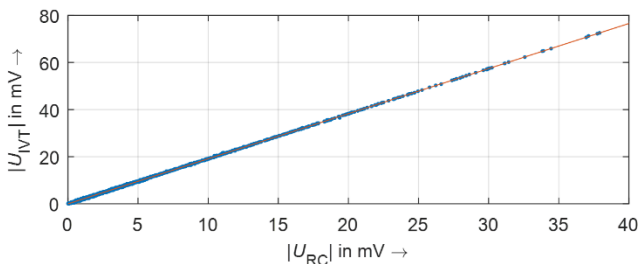


Bild 1: Beispiel für die Bestimmung des Betragsfehlers bei 2,3 kHz

Weiterhin wird für die lineare Regression das Bestimmtheitsmaß R^2 berechnet. Bild 2 zeigt das frequenzabhängige Übertragungsverhalten für alle Frequenzen mit einem Bestimmtheitsmaß besser als 99 %. Bis 3 kHz kann in diesem Beispiel das Übertragungsverhalten in hoher Auflösung bestimmt werden.

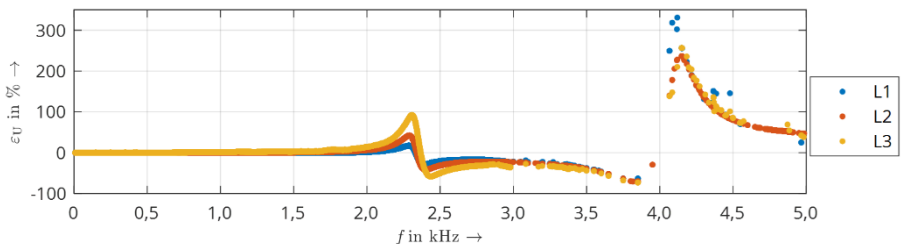


Bild 2: Frequenzabhängiges Übertragungsverhalten der induktiven Wandler

- [1] R. Stiegler, J. Meyer, J. Kilter, S. Konzelmann. *Assessment of voltage instrument transformers accuracy for harmonic measurements in transmission systems*. 2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Belo Horizonte, 2016, pp. 152-157.



Olga Zyabkina, M.Eng.
**Application of Frequency-Domain
Features for Automatic Anomaly
Detection in Power Quality
Measurements**

Recently network operators have intensified their Power Quality (PQ) measurement activities and as consequence, the amount of measurement data gets larger. In consequence, efficient methods for an automated extraction of useful information from the data become more and more important. One particular aspect is the detection of “atypical” behavior in time series of PQ parameters. Such deviations from “typical” behavior are referred to as anomaly (outlier or irregular behavior) and provide helpful hints to the network operators, as it indicates changes in the operating state of a network or connected customers.

As manual screening of the data is not feasible, automated methods to identify such anomalies are required. The flow chart in Figure 1 illustrates a general anomaly detection procedure for time series data and includes three main steps.

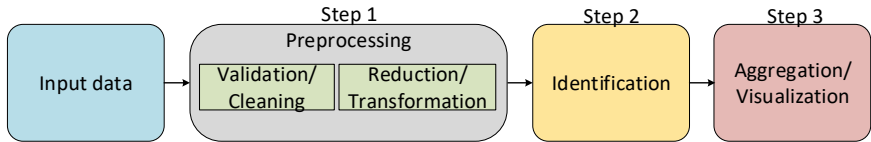


Fig. 1: A flow chart for anomaly detection

Each step can include one or more sub-steps and can be selected according to the specific anomalies. For example, in the first step, the preprocessing consists of the data validation and cleaning as well as an optional reduction or transformation of the data. The original input data can be used either as it is (untransformed) or transformed after applying additional transformation (e. g. Fourier-Transform). The choice of transformation depends on different facets such as data type, field of application, problem formulation, availability of knowledge about data. Consequently, the representation of time series data can be categorized as either frequency-domain or time-domain. From each domain, different features can be derived in order to improve the efficiency for identification and classification of abnormal behavior or patterns the second step.

An anomaly classification scheme and detection methods within the time-domain have been introduced in previous work [1, 2]. The detection methods based on transformations within the time-domain show good detection performance for sudden changes or anomalies consisting of a single value. However, these methods have limitations in detecting of anomalies with significant structural changes in the time series (e. g. the atypical day in Fig. 2). Transformations into the frequency domain are used in order to overcome the limitations off the existing methods within the time-domain. The Discrete Fourier Transform

(DFT) is applied to real measurement PQ data for the example in Fig. 2, which shows a “typical” day (blue line) and an “atypical” day (red line) for the time series of 3rd harmonic current of a shopping center. The “atypical” day has a significantly higher harmonic emission level during night and morning hours compared to the “typical” day. Applying DFT on both days, two spectrums can be received which are presented in Fig. 3.

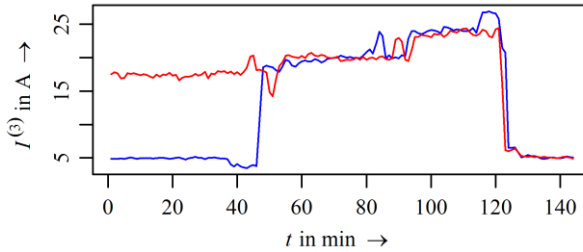


Fig. 2: “Typical” day (in blue) and “atypical” day (in red) in time series of the 3rd harmonic current for a shop area

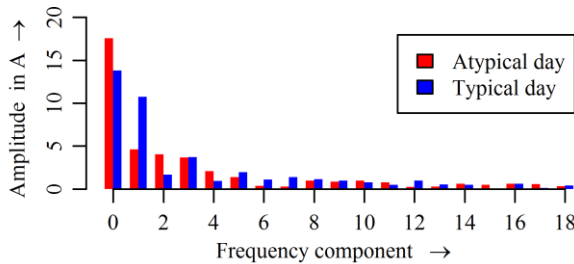


Fig. 3: Spectrums for “typical” day (in blue) and “atypical” day (in red) received after application of DFT on time series presented in Figure 2

The spectra show clear differences for the amplitude values of the first three frequency components. The “atypical” day has higher amplitude values for the DC component (zero frequency component) and the second frequency component, whereas the first frequency component is lower compared to the “typical” day. Such differences of the amplitude values can be used to design new features in order to identify such anomalies consisting of multiple values. Therefore, further development of new features based on the frequency domain and testing on different types of time series will be applied.

- [1] O. Zybalkina, M. Domagk, J. Meyer, P. Schegner. *Classification and Identification of Anomalies in Time Series of Power Quality Measurements*. In: IEEE PES Innovation Smart Grid Technology Conference Europe (ISGT Europe), 2016.
- [2] O. Zybalkina, M. Domagk, J. Meyer, P. Schegner. *A Feature-Based Method for Automatic Anomaly Identification in Power Quality Measurements*. In: 2018 IEEE International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2018.



Victor Khokhlov, M. Sc.
**Immunity assessment of household
 appliances in the frequency range
 from 2 to 150 kHz**

Gefördert durch:



Bundesministerium
 für Wirtschaft
 und Energie

aufgrund eines Beschlusses
 des Deutschen Bundestages

Increasing use of renewables, e-mobility and great demand for energy-efficient goods in the mass-market segment cause an increase of higher frequency disturbances in the range from 2 to 150 kHz (supraharmonics). This emission usually does not propagate very far, but can disturb other end user equipment, which can result in equipment malfunctions, audible noise, light flicker or lifetime reduction of electronic components due to additional thermal stress. Multiple cases of malfunctions, audible noise and flickering have been already described in several technical reports and papers.

For the purposes of this research, the effects of supraharmonic emission are grouped in two categories: long-term effects and short-term effects. The long-term effect is perceived as additional thermal stress for built-in components. The increase of active power consumption due to supraharmonic disturbances leads to additional heating of passive elements. Preliminary studies have shown that the increase in its operating temperature varies from 1 to 6 K if a constant supraharmonic voltage is applied [1]. This is a big challenge especially for electrolytic capacitors, which are used in the DC-link of rectifiers (e. g. in lamps with electronic ballast). Their lifetime is expected to decrease to the half by about 10 K temperature rise. The reduced lifetime put the electrolytic capacitor at risk of damage, which can cause malfunction of the device itself.

The short-term effect is perceived as a deviation from the expected operation of appliances. These malfunctions can be grouped in three categories: visual interference (flicker, image distortion), audible noise (excitation of mechanical resonances up to 20 kHz) and operational malfunctions (misconfiguration, unexpected results from programed tasks).

Appliances in this study are tested using two complementary approaches: single emissions (as suggested in standard IEC 61000-4-19) and emission bands (simultaneous emissions) between 2-150 kHz. According to standard IEC 61000-4-19, Level 3 test voltage was used in order to represent realistic conditions for tested appliances. Level 3 refers to typical residential, commercial and light industrial environment.

The long-term effect was evaluated in form of temperature increase of electrolytic capacitors. Applying the test levels according to the standard IEC 61000-4-19 shows that capacitor temperature can increase by up to 8 K depending on design and power of household appliances. Based on the model of aging of electrolytic capacitors, this temperature rise can result in an expected lifetime reduction of about 40 % (permanent presence of higher frequency distortions) compared to the lifetime in the undisturbed operation.

A close link between the thermal processes and the device's circuit topology has been observed. The power supplies with grid-side C-L-C filter tends to produce the biggest thermal stress for electrolytic capacitors due to supraharmonics. Fig. 1 exemplarily shows the results

of expected lifetime reduction for different household appliances by permanent presence of supraharmonic distortion.

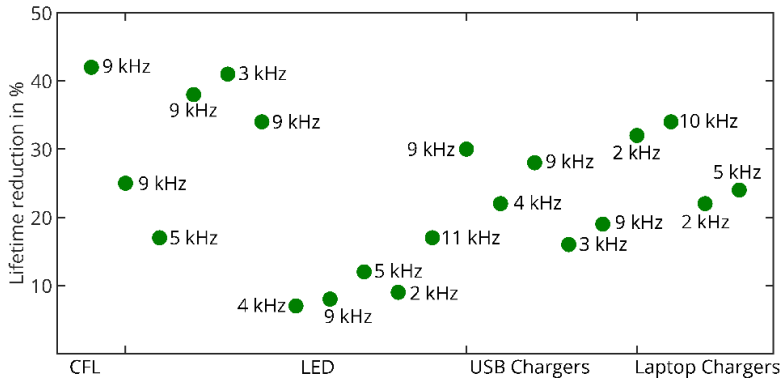


Fig. 1: Lifetime reduction of household appliances

Recent laboratory experiments have also shown that the use of constant supraharmonic emission over the fundamental voltage cycle is not a worst-case scenario. Despite their low rms voltage level, time-varying and pulsed higher frequency distortions (e. g. emission caused by using Power Line Communication) may lead to higher thermal stress of electrolytic capacitor and be even more dangerous in this sense.

With regard to short-term effects the majority of more than 50 examined household appliances in the research project VeNiFre150 [2] tends to be immune to supraharmonic emission. The most common malfunction on tested appliances is audible noise. Especially LED lamps are affected but additional acoustic emission is also observed in the operation of other devices (e. g. microwave oven, induction cooking plate, video game console, electronic visual display, stereo system and power supply units). Results from immunity tests show a strong dependence between input impedance and perceptible malfunctions. The impact of single emissions on the tested appliances is stronger than the impact of supraharmonic emission bands (with similar RMS value) in terms of visual and audible malfunction.

Despite the observed effects, supraharmonic disturbances seem to have a minor impact on the operation of household appliances. However, their impact on the additional thermal stress of built-in components is a crucial factor in long-term outlook. The presented results of the project shall be a useful contribution for the further discussion of the EMC coordination framework in the frequency range 2-150 kHz, especially the practical relevance of immunity levels given in IEC 61000-4-19.

[1] J. Meyer, V. Khokhlov, M. Klatt et al. *Overview and Classification of Interferences in the Frequency Range 2-150 kHz (Supraharmonics)*. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Amalfi Coast, Italy, 2018.

[2] TU Dresden. *Netzverträglichkeit in öffentlichen Niederspannungsnetzen im Frequenzbereich von 2 kHz bis 150 kHz*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2018.

Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Schutz- und Leittechnik“



Carlo Liebermann, Dipl.-Ing.
Einfluss der Belastung auf die
Symmetrie von
Hochspannungsfreileitungen

Freileitungen stellen nichtsymmetrische Betriebsmittel dar und werden zur Symmetrierung ab einer bestimmten Länge verdreht. Üblicherweise kommen bei Doppelleitungen γ – oder δ – Verdrehungen zum Einsatz, wobei sich diese Verdrehungsvarianten im Rotationssinn der Drehstromsysteme unterscheiden.

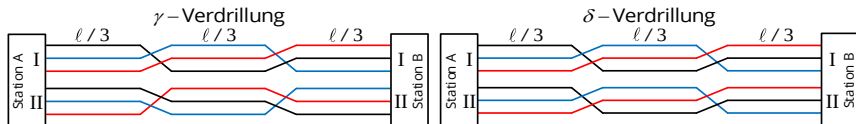


Bild 1: γ -Verdrillung (links) und δ -Verdrillung (rechts)

Durch die elektromagnetische Verkopplung des Mehrleitersystems werden Strom und Spannung entlang der Leitung beeinflusst. Die Unsymmetrie kann mit dem nach der IEC 61000-3-13 [1] festgelegten Quotienten der Gegen- zur Mitsystemspannung bewertet werden (Symmetrie in Station A vorausgesetzt).

$$\frac{|U_{2 \text{ B I/II}}|}{|U_{1 \text{ B I/II}}|} = \frac{|U_{L1 \text{ B I/II}} + \underline{a}^2 \cdot U_{L2 \text{ B I/II}} + \underline{a} \cdot U_{L3 \text{ B I/II}}|}{|U_{L1 \text{ B I/II}} + \underline{a} \cdot U_{L2 \text{ B I/II}} + \underline{a}^2 \cdot U_{L1 \text{ B I/II}}|} \quad (1)$$

Die Spannungsbeeinflussung wird *vorwiegend* durch Induktion bestimmt und ist somit vom Durchgangsstrom $\underline{I}$ bzw. der Belastung abhängig. Induzierte Spannungen werden *vereinfacht* aus dem Produkt von Koppelimpedanz und Durchgangsstrom berechnet. Die Größe der Koppelimpedanzen ist dabei proportional zum Logarithmus der Leiterabstände. Aus diesem Grund kann eine Proportionalität zwischen logarithmiertem Abstand und der induzierten Längsspannung $\underline{U}_{\text{ind}}$ angenommen werden. Für diesen Fall wird ein abstandsabhängiges Induktionsäquivalent $\underline{K}$ bestimmt, welches zur Abschätzung der Lastabhängigkeit geeignet ist. Die Kenngröße im beeinflussten Leiter i berechnet sich aus der Summe der komplexen Durchgangsströme des beeinflussenden Leiters j , wobei der logarithmierte Abstand unter Beachtung der Länge in jedem Verdrehungsabschnitt (VAS) multipliziert werden muss (M_L - Menge der Leiter).

$$\underline{K}_{i \text{ VAS}} = -\ell_{\text{VAS}} \cdot \sum_j \ln(D_{ij \text{ VAS}}) \cdot I_j \cdot e^{(j \angle L_j)} \quad \forall j \in M_L \setminus i \quad (2)$$

Für den angestrebten Fall von *symmetrischen Durchgangsströmen* in beiden Drehstromsystemen in Station A hängt das Äquivalent dann allein von der Phasenlage der Ströme und dem logarithmierten Leiterabstand ab.

$$\underline{K}_{\text{symm } i \text{ VAS}} = -\ell_{\text{VAS}} \cdot \sum_j \ln(D_{ij \text{ VAS}}) \cdot e^{(j \angle L_j)} \quad \forall j \in M_L \setminus i \quad (3)$$

Das Induktionsäquivalent eines Leiters i der gesamten Leitung wird durch die Summe der in den jeweiligen VAS bestimmten Teiläquivalente berechnet.

$$\underline{K}_{\text{symm } i \text{ LTG}} = \sum_{\text{VAS}} \underline{K}_{\text{symm } i \text{ VAS}} \quad (4)$$

Folgende Äquivalente gelten für das in Deutschland oftmals vorkommende Donaumastbild mit gleicher Phasenfolge bei idealer 1/3- Teilung der Leitungslänge:

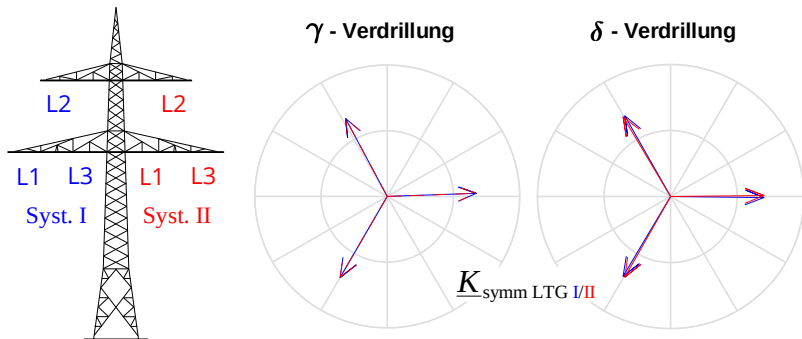


Bild 2: Donaumast mit äquivalenter Phasenfolge, Induktionsäquivalent bei γ - u. δ -Verdrillung

Die Induktionsäquivalente lassen folgende Interpretationen zu:

1. Nicht symmetrische Äquivalente (γ -Verdrillung)
Es werden *unsymmetrische Spannungen* induziert. Die Überlagerung der induzierten – und unsymmetrischen – Spannungen mit den symmetrischen Spannungen in Station A führt mit steigendem Durchgangsstrom zur *Zunahme der Unsymmetrie* in Station B.
2. Äquivalente sind symmetrisch (δ -Verdrillung)
In den Leitern werden *symmetrische Spannungen* induziert. Die Überlagerung der induzierten – und symmetrischen – Spannungen mit den symmetrischen Spannungen in Station A führt mit steigendem Durchgangsstrom zu *keiner Zunahme der Unsymmetrie* in Station B.

Bei Änderung der Phasenfolge muss auch mit abweichender Beeinflussung gerechnet werden. Eine optimale Verdrillung ist deshalb immer individuell zu ermitteln. Mit der konventionellen Betrachtung mittlerer Abstände kann keine Aussage zur lastabhängigen Unsymmetrie gewonnen werden, da die mittleren Abstände unabhängig von der Verdrillung äquivalent sind.

[1] IEC 61000-3-13:2002: *Assessment of emission limits for the connection of unbalanced installations to MV, HV and EHV power systems.*

**Jörg Meyer, Dr.-Ing.**

Dimensionierung von Stromwandlern für Schutzzwecke

Die richtige Dimensionierung von Stromwandlern für Schutzzwecke ist Grundlage für eine bestimmungsgemäße Funktion des Schutzkonzepts. Diese erfolgt i. d. R. über die Dimensionierung nach dem stationären und dem transienten Übertragungsverhalten. Dimensionierungsgrundlage ist die max. Hauptfeldspannung U_{ALF} , bis zu welcher der Wandler betrieben werden kann, dass gerade noch keine Sättigung auftritt und damit die Anforderungen an die Genauigkeit noch eingehalten werden. Aus den Herstellerangaben kann U_{ALF} mit den Bemessungsgrößen (Index: r – linke Spalte) berechnet werden und damit schließlich auf die tatsächlichen Betriebsbedingungen (Index: b – rechte Spalte) umgerechnet werden.

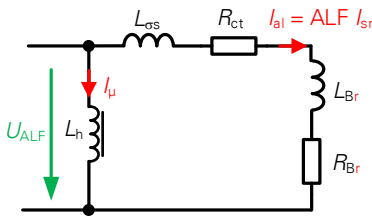


Bild 1: Ersatzschaltbild des Stromwandlers an der Genauigkeitsgrenze mit Bemessungsgrößen

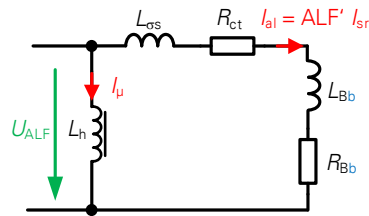


Bild 2: Ersatzschaltbild des Stromwandlers an der Genauigkeitsgrenze mit Betriebsgrößen

Die maximale Hauptfeldspannung U_{ALF} ist konstruktiv vom Wandler vorgegeben und darf nicht überschritten werden. U_{ALF} gilt also für beide Betriebsfälle gleichermaßen - die Gleichungen können damit gleichgesetzt werden. Unter der Vernachlässigung der sekundären Streureaktanz $L_{\sigma s}$ und der Betragsbildung der Zähler- und Nennerimpedanzen kann der Betriebsüberstromfaktor ALF' damit wie folgt berechnet werden:

$$ALF' = ALF \frac{|R_{ct} + \underline{Z}_{Br}|}{|R_{ct} + \underline{Z}_{Bb}|} \quad (1)$$

Der sekundäre Innenwiderstand R_{ct} des Wandlers hat einen Einfluss auf den Betriebsüberstromfaktor. Er sollte bei der Berechnung des Betriebsüberstromfaktors berücksichtigt werden.

Transiente Dimensionierung:

Die transiente Stromwandlerdimensionierung basiert auf der Berechnung der maximal möglichen Flussamplitude im Kernmaterial und berücksichtigt dabei die Verlagerung des zu übertragenden Stromes. Für die Berechnung des transienten Überdimensionierungsfaktors

wird die Amplitude des Flusses bei verlagertem Primärstrom ins Verhältnis zur Flussamplitude bei sinusförmigen (unverlagerten) Primärstrom gesetzt.

$$K_{tf}(t) = \frac{\psi_{\text{trans}}(t)}{\psi_{\text{stat}}} \quad (2)$$

Die Berechnung des Kernflusses erfolgt über das Induktionsgesetz und unter Vernachlässigung von Remanenz und sekundärer Wandlerinduktivität über:

$$\psi(t) = \int u_h(t) dt = R_s \int i_s(t) dt \quad (3)$$

Der sekundäre Wandlerstrom ergibt sich bei vollverlagertem primärseitigem Kurzschlussstrom

$$i'_p(t) = i'_p [e^{-t/\tau_p} \cos(\theta) - \cos(\omega t + \theta)] \quad (4)$$

unter Berücksichtigung des Übertragungsverhaltens des Stromwandlers zu:

$$i_s(t) = \frac{L_{hu}}{L_{hu} + L_s} i'_p \left[\frac{T_s}{T_p - T_s} (e^{-t/\tau_s} - e^{-t/\tau_p}) + \frac{\omega T_s}{1 + \omega^2 T_s^2} (\sin(\omega t) - \omega T_s \cos(\omega t) + \omega T_s e^{-t/\tau_s}) \right] \quad (5)$$

Dabei ist T_s die sekundäre Wandlerzeitkonstante.

Damit lässt sich nach Gleichung (3) der Verlauf des Transientfaktors berechnen:

$$K_{tf}(t) = \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} (e^{-t/\tau_p} - e^{-t/\tau_s}) - \frac{1}{\omega T_s} \cos(\omega t) - \sin(\omega t) \quad (6)$$

Für die Berechnung des späteren Überdimensionierungsfaktors wird eine sog. Peak-Kurve aus dem Verlauf des Transientfaktors berechnet. (Annäherung der Amplitude der überlagerten Sinus- und Kosinusanteile).

$$K_{tf \text{ peak}}(t) = \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} (e^{-t/\tau_p} - e^{-t/\tau_s}) + 1 \quad (7)$$

Der transiente Überdimensionierungsfaktor ergibt sich, wenn in die Gleichung der Peak-Kurve der Transientfaktor $K_{tf \text{ peak}}(t)$ für $t = t_{al}$ (Sättigungsfreie Übertragungszeit) gesetzt wird.

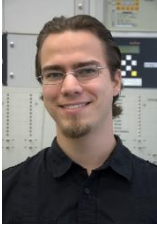
$$K_{td} = \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} (e^{-t_{al}/\tau_p} - e^{-t_{al}/\tau_s}) + 1 \quad (8)$$

Gesamtes Übertragungsverhalten

Die maximale Hauptfeldspannung U_{ALF} ist konstruktiv vom Wandler vorgegeben und darf nicht überschritten werden, da sonst Sättigung eintritt. U_{ALF} darf also auch unter Berücksichtigung des transienten Überdimensionierungsfaktors nicht überschritten werden.

$$U_{ALF} = K_{td} ALF I_{sn} [R_{ct} + R_{Bb} + j\omega (L_{os} + L_{Bb})] \quad (9)$$

- [1] DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE: IEC/TR 61869-100. Instrument Transformers - Guide for Application of Current Transformers in Power System Protection; Englische Fassung. Frankfurt am Main, VDE – DKE, 13.05.2014.



Sebastian Palm, Dipl.-Ing.

Bewertung der Wahrscheinlichkeit von unbeabsichtigten Inselnetzen im Verteilnetz

Gefördert durch:
DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft

Durch den stetigen Zubau von dezentralen Erzeugungsanlagen (DEA) entstehen in zunehmendem Maße Teilnetze, die über bestimmte Zeiträume oder auch längerfristig eine ausgeglichene Leistungsbilanz aufweisen. Werden solche Teilnetze vom restlichen Verbundnetz getrennt, so besteht die Gefahr der Bildung eines ungewollten Inselnetzes. Für Netzbetreiber sind ungewollte Inselnetze eine nicht zu unterschätzende Gefahr, da in den betroffenen Teilnetzen trotz geöffnetem Leistungsschalter keine Spannungsfreiheit mehr gewährleistet werden kann. Aus diesem Grund ist es von großer Bedeutung die Wahrscheinlichkeit der Bildung eines ungewollten Inselnetzes bereits vor der Trennung eines Teilnetzes bewerten zu können.

Zur Bewertung der Inselnetz Wahrscheinlichkeit werden zunächst kritische Kombinationen aus DEA und elektrischen Lasten (EL) durch Bestimmung der Nichtdetektierbaren Zone (NDZ), in denen die Wahrscheinlichkeit der stabilen Inselnetzbildung besonders groß ist, identifiziert. Für einen Teil des CIGRE-Benchmark-Verteilnetzes aus Bild 1 ist in Bild 2 die ermittelte NDZ dargestellt. Situationen, in denen der Entkopplungsschutz der DEA das Inselnetz nicht beenden konnte, werden dabei der NDZ zugeordnet.

Für jeden Betrachtungszeitpunkt kann mit der Kenntnis der aktuellen Leistungsbilanz im Teilnetz, wie in Bild 2 dargestellt, ein kritischer NDZ-Bereich ermittelt werden, innerhalb dessen ungewollte Inselnetze auftreten können. Als Resultat dieser Untersuchung werden demnach für jeden Zeitpunkt nach Gl. (1) untere und obere Grenzen ($p_{krit\,u}$, $p_{krit\,o}$) des NDZ-

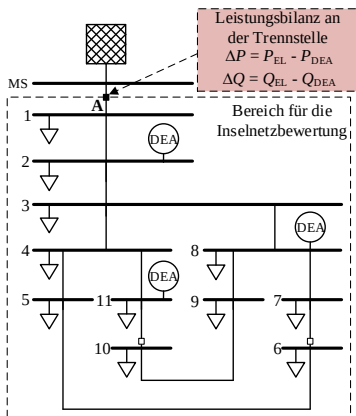


Bild 1: Untersuchtes Teilnetz des CIGRE-Benchmark Verteilnetzes [1]

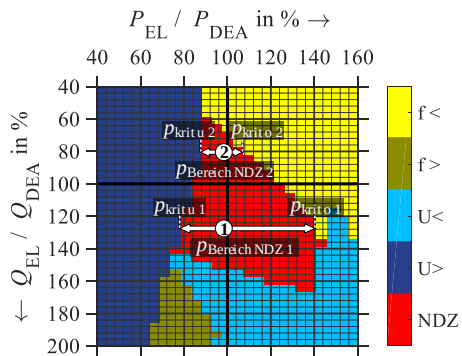


Bild 2: NDZ für das untersuchte Teilnetz und NDZ-Bereiche für zwei Zustände

Bereiches aus der jeweiligen Zeile $q = Q_{EL}/Q_{DEA}$ bestimmt. Analog erfolgt die Bestimmung der Blindleistungsgrenzen $q_{krit\ u}$ und $q_{krit\ o}$ aus den Spalten $p = P_{EL}/P_{DEA}$ der NDZ.

$$(p_{krit\ u}, p_{krit\ o}) = \begin{cases} (\min, \max) \left(\frac{P_{EL}}{P_{DEA}} \right)_{NDZ} & \text{für } q = \frac{Q_{EL}}{Q_{DEA}} \\ 1 & \text{wenn } \left(\frac{P_{EL}}{P_{DEA}} \right)_{NDZ} = \emptyset \end{cases} \quad (1)$$

Für Zeitpunkte, in denen die Gln. (2) gelten, besteht die erhöhte Gefahr eines ungewollten Inselnetzes im Falle einer Trennung des betrachteten Teilnetzes. Dies ist in Bild 3 für generische Erzeuger- und Lastkombinationen und die NDZ des Netzes aus Bild 1 dargestellt. Kritische Bereiche in dieser Darstellung sind demnach alle Zeiträume, in denen die aktuellen Leistungsbilanzen (blaue Kurven) innerhalb der jeweiligen NDZ-Bereiche liegen (orangene Flächen). Dies ist in diesem konkreten Fall in drei Zeiträumen der Fall. In diesen sollte eine gezielte Trennung des Teilnetzes daher nur nach präventiven Maßnahmen erfolgen.

$$p_{krit\ u} \leq \frac{P_{EL}}{P_{DEA}} \leq p_{krit\ o} \quad \text{und} \quad q_{krit\ u} \leq \frac{Q_{EL}}{Q_{DEA}} \leq q_{krit\ o} \quad (2)$$

Anstelle der harten Grenzen des NDZ-Bereiches in den Gln. (2) können zusätzlich Wahrscheinlichkeitsverteilungen definiert werden, um an den Grenzen der NDZ eine Unschärfe, die aus Messfehlern und der Ermittlung der NDZ resultiert, zu berücksichtigen.

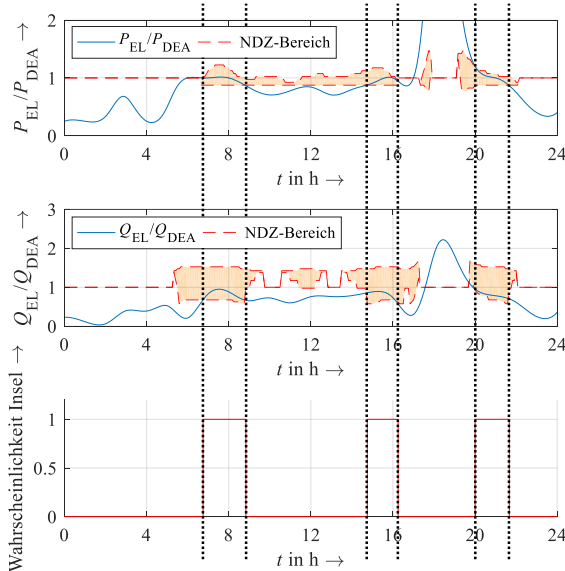


Bild 3: Kritische Bereiche für Wirk- und Blindleistungsverhältnisse und Wahrscheinlichkeit des Auftretens von ungewollten Inselnetzen

[1] CIGRE Task Force C6.04: *Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources*, 2014 — ISBN 9782858732708.



Karsten Wenzlaff, M.Sc.

Untersuchungen zum Zündverhalten von Niederspannungsstörlichtbögen

Störlichtbögen sind ungewollte Gasentladungen. Besonders stromstarke Störlichtbögen mit einem Lichtbogenstrom größer 1 kA stellen eine erhebliche Gefährdung für Anlagen und Personen dar. In der Niederspannung kann es aufgrund der geringen Spannung nicht zu einem Durchschlag in der Luft kommen. Dies bedingt es, dass eine Lichtbogenzündung mit einem Vorfehlerezustand verbunden ist. Typische Ursachen für eine Lichtbogenzündung sind falsch dimensionierte Betriebsmittel oder Tiere in einer Anlage. Zusätzlich können unsachgemäße Wartungs- und Bedienarbeiten, wie beispielsweise die Missachtung der fünf Sicherheitsregeln oder vergessenes Werkzeug, einen Störlichtbogen auslösen.

Physikalisch, technische Beschreibung ungewollter Lichtbogenzündungen

Ein Vorfehlerezustand eines Störlichtbogens zeichnet sich dadurch aus, dass es eine leitende Verbindung zwischen mindestens zwei Elektroden gibt. Diese leitende Verbindung kann bei einer unzureichenden Kontaktierung in Folge der Lorentzkraft sich öffnen und dadurch einen Störlichtbogen verursachen. Der damit verbundene serielle Störlichtbogen kann schnell zu einem parallelen Störlichtbogen übergehen. Zum anderen besteht die Möglichkeit, dass die leitende Verbindung nicht für die benötigte Stromtragfähigkeit des Fehlerstroms vorgesehen ist und es aufgrund der übermäßigen Erwärmung zum Aufschmelzprozess der Verbindung kommt. In Folge dessen kann ebenfalls eine ungewollte Lichtbogenzündung eingeleitet werden.

Synthetische, reproduzierbare Lichtbogenzündungen

Für die Untersuchung von Störlichtbögen und deren Schutzsystemen sind reproduzierbare, synthetische Lichtbogenzündungen erforderlich. Hierzu hat es sich in der Praxis erwiesen, den Lichtbogen über einen dünnen Zünddraht, der nicht für die Stromtragfähigkeit des Prüfstroms bestimmt ist, zu zünden. Diese synthetische Lichtbogenzündung entspricht physikalisch somit grundsätzlich einem praxistypischen Verhalten der Lichtbogenzündung.

Untersuchung der Einflussfaktoren

Am National Arc fault Research Center (NARC) werden umfangreiche Untersuchungen zum Einfluss der Lichtbogenzündungsart durchgeführt. Fokussiert werden dabei die Auswirkungen auf Strom- und Spannungsverläufe. Hierzu steht am NARC eine Lichtbogenbrennkammer zur Verfügung, mit der sich beispielsweise unterschiedlichste Konstellationen von Elektrodenanordnungen und Zünddrahtbefestigungen sowie Zündmethoden untersuchen lassen. Bild 1 zeigt den Versuchsstand mit der Lichtbogenbrennkammer als 1-polige Anordnung. Bild 2 zeigt dazu eine direkte Anordnung der Elektroden mit 30 mm Abstand und einem Zünddraht (links) sowie die Elektroden nach der Lichtbogenzündung (rechts).



Bild 1: Lichtbogenversuchsstand am NARC zur Untersuchung synthetischer Lichtbogenzündungen

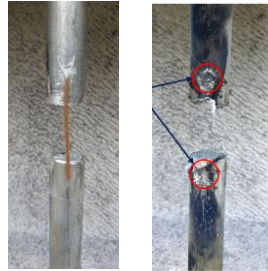


Bild 2: Elektroden mit Zünddraht (links) und nach Lichtbogenzündung (rechts)

Der Einsatz einer synthetischen Lichtbogenzündung mittels Zünddraht ist neben dem Fehlerstrom und dem Zündwinkel ebenfalls von der Länge und dem Querschnitt sowie dem Material des Zünddrahts und auch dessen Befestigung an den Elektroden abhängig. Für die Untersuchung zum Einfluss der einzelnen Parameter werden reproduzierbare Versuche durchgeführt - beispielsweise durch eine gesteuerte Einschaltung der Versuche wird ein gleichbleibender Zündwinkel sichergestellt.

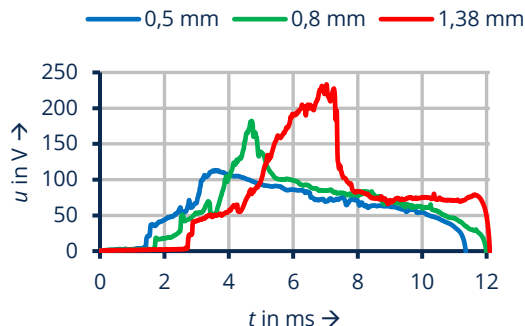


Bild 3: Spannungsverlauf an der Lichtbogenbrennstelle für unterschiedliche Zünddrahtdurchmesser

Entsprechend Bild 3 ist erkennbar, dass der Durchmesser des Zünddrahts bei gleichbleibenden Zündbedingungen einen signifikanten Einfluss auf den Spannungsverlauf hat. Bei einem Zünddraht mit größerem Durchmesser setzt der Aufschmelzprozess wesentlich später ein. Dies führt dazu, dass die Phase zwischen der Ausbildung erster Teillichtbögen, wie sie auf Bild 2 an den Elektroden und auf Bild 3 bei 3 ms am roten Verlauf erkennbar sind, und dem Erreichen des Spannungsmaximums, das eine vollständige Lichtbogenzündung darstellt, wesentlich länger andauert. Zukünftig sollen diese Erkenntnisse auf den Einfluss bei realen ungewollten Lichtbogenzündungen untersucht werden.

Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Smart Grid“



Tobias Heß, Dipl.-Ing.
Anforderungen und Konzepte des
sektorenübergreifenden
Energiemanagements

Gefördert durch:



Um die Ziele der Energiewende zu erreichen, wird die Sektorkopplung als Schlüsseltechnologie angesehen [1]. Die Sektorkopplung bezeichnet dabei die Verbindung der Sektoren in der Energiewirtschaft. Diese wird durch verschiedene Technologien realisiert, die elektrische Energie aus Erneuerbaren Quellen direkt oder indirekt in die benötigte Endenergie in den Sektoren Wärme und Verkehr umwandeln. Fossile Brennstoffe werden somit durch Erneuerbare Energie substituiert. Gleichzeitig können durch die vorhandenen Speicher in den Sektoren Wärme und Verkehr Flexibilitäten im elektrischen Energiesystem bereitgestellt werden. Um diese Flexibilitäten gezielt einzusetzen, wird ein für die Sektorkopplung angepasstes Energiemanagement benötigt. Im Vergleich zum aktuellen Energiemanagement, welches im Wesentlichen durch den Energiehandel erfolgt, müssen zusätzliche Anforderungen Berücksichtigung finden.

Restriktionen in den verbundenen Sektoren: Der Einsatz von Anlagen der Sektorkopplung ist maßgeblich durch den Bedarf in den verbundenen Sektoren limitiert. Zudem bestimmen die vorhandenen Speicher die Flexibilität der Anlagen.

Netzrestriktionen: Durch den koordinierten Betrieb der Anlagen im Energiemanagement entsteht eine hohe Gleichzeitigkeit. Dies kann zu Engpässen vor allem im Verteilnetz führen. Aufgrund der Vielzahl von Verteilnetzen und des hohen Aufwandes des Engpassmanagements müssen Netzrestriktionen bereits beim Energiemanagement beachtet werden.

Anzahl der Anlagen: Die Technologien der Sektorkopplung wie Wärmepumpen, KWK-Anlagen, Batterie-Elektrische-Fahrzeuge finden vor allem im Haushalt ihre Anwendung und haben nur eine geringe elektrische Leistung. Dies macht es erforderlich, eine hohe Anzahl dieser Anlagen in das Energiemanagement zu integrieren.

Technikneutralität: Die Technologien der Anlagen in der Sektorkopplung unterscheiden sich stark voneinander. Das Energiemanagement muss daher technologieneutral sein. Die Herausforderung besteht dabei jedoch darin, dass die technologieabhängigen Restriktionen bei der Planung mit einbezogen werden müssen.

Datensicherheit und Datenschutz: Die Anlagen der Sektorkopplung sind überwiegend im Haushalt zu finden. Der Betrieb im Verbund bedarf jedoch einer Reihe von Messwerten. Aus diesen Daten lassen sich in der Regel schnell personenbeziehbare Informationen ableiten, z. B. kann aus dem thermischen Energiebedarf des Gebäudes auf die Anwesenheit der

Personen geschlossen werden. Die Datensicherheit und der Datenschutz muss daher stets beachtet werden.

Zur Bewältigung der zuvor dargestellten Anforderungen sind drei grundlegende Konzepte für das sektorübergreifende Energiemanagement entwickelt worden.

Ebenenansatz:

Der Ebenenansatz strukturiert die steuerbaren Anlagen im Verbund anhand ihrer Position im Verteilnetz. Die Ebenen teilen sich dabei in die Anlagen-Ebenen, die Netz-Ebenen und die VK-Ebenen auf. Bild 1 stellt die Struktur der Ebenen dar. Durch das Konzept des Ebenenansatzes werden die Anforderungen nach einer hohen Anzahl von Anlagen, der Datensicherheit und des Datenschutzes und die Berücksichtigung der Netzrestriktionen eingeschlossen [2].

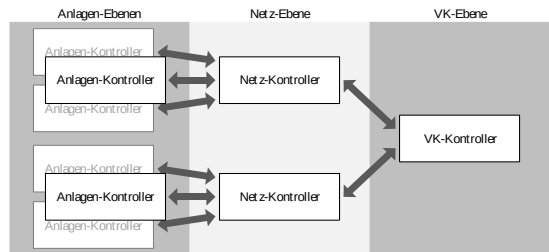
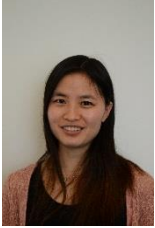


Bild 1: Ebenenstruktur des sektorübergreifenden Energiemanagements

Einsatzgrenzen des Verteilnetzes: Durch das Konzept der Einsatzgrenzen werden mögliche Netzengpässe dadurch verhindert, dass bei der Vermarktung der elektrischen Energie der Anlagen die Netzrestriktionen mit betrachtet werden. Dafür wird eine für das Verteilnetz allgemeingültige Kenngröße berechnet, die einen sicheren Betrieb der Anlagen gewährleistet [3].

Allgemeingültiges Flexibilitätsmodell: Das Konzept des allgemeingültigen Flexibilitätsmodells verfolgt das Ziel, die Betriebs- und Flexibilitätsprognose der steuerbaren Anlagen unabhängig der Anlagentechnologie und der genauen Anlagenkonfiguration zu beschreiben. Das allgemeingültige Flexibilitätsmodell ist dabei so gestaltet, dass die Aggregation über die verschiedenen Ebenen des Ebenenansatzes möglich ist. Zusätzlich können damit in der Netz-Ebene die Netzrestriktionen mit dem allgemeingültigen Flexibilitätsmodell einbezogen werden [2, 4, 5].

- [1] N. Gerhardt et al. *Interaktion EE-Strom, Wärme, Verkehr*. Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (Fraunhofer IWES), Kassel, 2015.
- [2] T. Heß, P. Schegner et al. *Regionale Virtuelle Kraftwerke - Aufbau und Chancen*. In: Kraftwerktechnisches Kolloquium 2012, Dresden, 2012.
- [3] T. Heß, P. Schegner. *Einsatzgrenzen im Verteilnetz für das integrale Last- und Erzeugungsmanagement*. In: 3. Dialogplattform Power-to-Heat, Berlin, 15. und 16. Mai 2017.
- [4] T. Heß, P. Schegner. *Power schedule planning and operation algorithm of the Local Virtual Power Plant based on μ CHP-devices*. In: 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2015.
- [5] J. Seifert, T. Heß, J. Werner. *Kopplung von Elektroenergie- und Wärmemarkt am Beispiel dezentraler vernetzter Systeme*. GI, Bd. 137 (2016), Nr. 1, S. 4–15.



Liya Ma, Dipl.-Ing.
Ereignisdetektion für die
Lastdisaggregation

Durch das Non-Intrusive Load Monitoring (NILM) wird der elektrische Energieverbrauch auf Geräteebeane eines Haushalts bestimmt. Die Messungen finden dabei jedoch am Hausanschluss und nicht an Einzelgeräten statt. Durch die sogenannte Disaggregation ermöglicht diese Technik ein detailliertes Geräte-Monitoring mit einem geringen Hardware Aufwand. Es gibt mehrere Verfahren zum NILM. Eine der häufig verwendeten Methoden ist die ereignisbasierte Lastdisaggregation [1]. Dabei werden die Gerätemuster anhand der Gesamtverbrauchsdaten generiert und zur Disaggregation genutzt. Zur Generierung der Gerätemuster werden zuerst Ereignisse bzw. die Ein- und Ausschaltvorgänge detektiert. Anschließend werden gerätespezifische Merkmale, wie z. B. Wirk- und Blindleistung bei den Schaltvorgängen extrahiert. Anhand dieser Merkmale können die Ereignisse den Geräten zugeordnet werden. Dieser Beitrag stellt ein Verfahren zur Ereignisdetektion dar, welcher insbesondere für Lastdisaggregation geeignet ist.

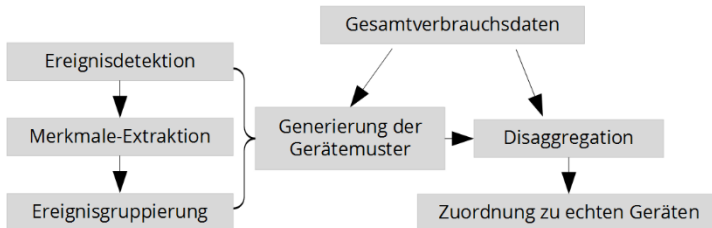


Bild 1: Prinzip der ereignisbasierte Lastdisaggregation

Bild 2 zeigt den Lastverlauf des Waschvorgangs einer Waschmaschine, einer Glühlampe und einer Kompaktleuchtstofflampe (CFL). Die Wirkleistung der Glühlampe entspricht der Leistungsmittelwerterhöhung im Zeitbereich t_{ein} gegenüber t_{aus} . Um diese Leistung richtig zu erfassen, müssen sich die Schaltvorgänge S_1 und S_2 von den Leistungsänderungen der Waschmaschine unterscheiden lassen. Optisch wird dies unter zwei Bedingungen erkannt: Zum einen tritt eine erkennbare Leistungserhöhung auf. Zum anderen ist die Ein- und Ausschalt-dauer der Glühlampe länger als die Periode der Leistungsänderungen der Waschmaschine. Eine von den minimalen Ein- und Ausschalt-dauern der Geräte ($T_{\text{ein min}}$ und $T_{\text{aus min}}$) abhängige schrittweise Ereignisdetektion wird ausgehend von diesen Überlegungen entwickelt. Dafür werden zwei Parameter definiert, Sprunghöhe und Fallhöhe. Die Sprunghöhe der Wirkleistung P_{Sh} ergibt sich aus der Erhöhung des Leistungsmittelwerts von $[t - T_{\text{aus min}}, t]$ bis $(t, t + T_{\text{ein min}}]$ und die Fallhöhe P_{Ph} aus der Reduktion des Leistungsmittelwerts von $[t - T_{\text{ein min}}, t]$ bis $(t, t + T_{\text{aus min}}]$.

$$P_{Sh}(t) = \bar{P}_{[t, t+T_{ein\ min}]} - \bar{P}_{[t-T_{aus\ min}, t]} \quad (1)$$

$$P_{Fh}(t) = \bar{P}_{[t-T_{ein\ min}, t]} - \bar{P}_{[t, t+T_{aus\ min}]} \quad (2)$$

Somit ist die Sprunghöhe beim Einschalten positiv, beim Ausschalten negativ und die Fallhöhe dagegen beim Einschalten negativ, beim Ausschalten positiv (siehe Bild 2). Die Spitzen der P_{Sh} entsprechen den Einschaltpunkten und die der P_{Fh} den Ausschaltpunkten. Dabei werden nur die Ereignisse mit einer Mindesteinschaltdauer von $T_{ein\ min}$ detektiert.

Im Bild 3 werden die Detektionsergebnisse für den Lastverlauf des Bildes 2 dargestellt. Mit der schrittweisen Detektion werden die Schaltvorgänge der Glühlampe und der CFL im ers-

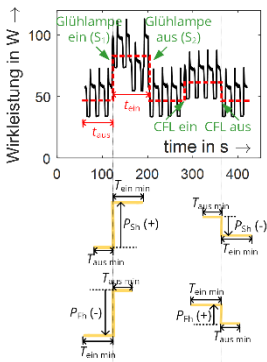


Bild 2: Waschvorgang einer Waschmaschine mit Glühlampe und CFL, sowie Beispiele zur Ermittlung der P_{Sh} , P_{Fh} nach Gl. (1) und (2)

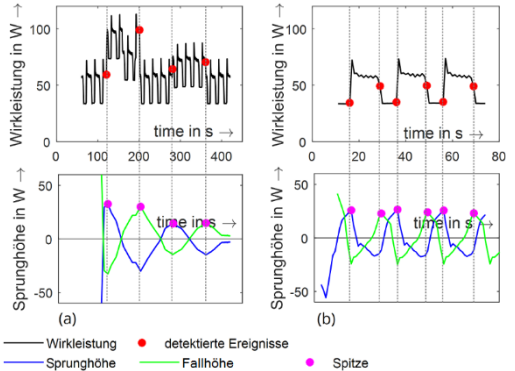


Bild 3: Ereignisdetektion für den Betrieb im Bild 2 mit (a) $T_{ein\ min} = 60\ s$, $T_{aus\ min} = 60\ s$, (b) $T_{ein\ min} = 10\ s$, $T_{aus\ min} = 3\ s$

ten Schritt erkannt und somit können die richtigen Mittelwertänderungen abgebildet werden. Die automatischen Ein- und Ausschaltvorgänge der Waschmaschine werden im zweiten Schritt korrekt erkannt, obwohl die Ausschaltdauern dabei sehr kurz sind. Zusammengefasst hat dieses Verfahren folgende Vorteile:

- Einfache Parametrierung
- Toleranz gegenüber Rauschen, Nutzungsüberlapp von Geräte und Leistungsschwankungen
- Vereinfachung der Gruppierung durch die Variierung der minimalen Ein- und Ausschaltdauern $T_{ein\ min}$ und $T_{aus\ min}$ sowie das Filtern der Spitzen mit einer mindesten Leistungsänderung
- Unabhängige parametrierbare Ein- und Ausschaltdauer $T_{ein\ min}$ und $T_{aus\ min}$

[1] R. Bonfigli, S. Squartini et al. *Unsupervised Algorithms for Non-Intrusive Load Monitoring: an Up-to-Date Overview*. In: IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering, 2015.



Sasan Rasti, Dipl.-Ing.
Framework zur
Parameteridentifikation von
Liegenschaften und steuerbaren
Anlagen

Gefördert durch:



Bei der Energieversorgung von Gebäuden ist ein hoher Anteil regenerativer Energieträger gewünscht. Diese Versorgungssysteme werden häufig statisch ausgelegt. Daraus resultiert eine schlechte Abstimmung zwischen Verbraucher-, Erzeuger- und Speichereinrichtungen und damit eine Fehldimensionierung und hohe Kosten für den Betreiber. Zusätzlich ist aufgrund der Vielfältigkeit der verfügbaren Anlagensysteme eine Einbindung in ein Energiemanagementsystem aufwendig, da charakteristische Eigenschaften und Betriebsabläufe der Systeme erst identifiziert werden müssen.

Aufgrund der genannten Problemstellung ist ein Framework zu entwickeln, das relevante Messwerte der Versorgungssysteme aufnimmt und daraus selbstständig Parameter ableitet, welche zu deren Optimierung sowie Einbettung in ein Managementsystem dienen.

Das Framework besteht demnach aus zwei Komponenten:

1. Messsystem zur Einbringung in die zu untersuchenden Gebäude
2. Analysesoftware zur Verarbeitung der aufgezeichneten Daten

Das Messsystem setzt sich aus mehreren Datenerfassungseinheiten (DEE) zusammen, die je nach gewünschter Konfiguration und Messanforderung modular zusammengeschaltet werden können. Die einzelnen DEE erfassen sowohl thermische (Volumenströme, Temperaturen), als auch elektrische Größen (Spannungen, Ströme). Die Anbindungen an die Messpunkte erfolgen dabei nichtinvasiv, sodass das System „Plug&Play“-fähig einsetzbar ist und keine baulichen Maßnahmen erforderlich sind. Jede DEE ist mit einem eigenen Einplatinencomputer zusammen mit eigens für die Anwendung entwickelter Software ausgestattet. Die DEE werden durch einen zentralen Controller überwacht und gesteuert. Dieser stellt somit den gesamten Messablauf sicher, speichert die Messdaten ab und überträgt diese auf entsprechende Server. Die Kommunikation innerhalb des Gebäudes kann über LAN/WLAN, aber auch über Low Power Wide Area Networks (LPWAN) erfolgen, die einen geringen Energieverbrauch und eine hohe Reichweite aufweisen. Beim Einsatz letzterer Kommunikationstechnologie kann eine DEE batteriebetrieben verwendet werden, wodurch eine Verwendung auch in schlecht erschlossenen Räumen mit geringem Aufwand möglich ist. Die Kommunikation nach außen kann über einen herkömmlichen Internetanschluss oder über Mobilfunk realisiert werden.

In dem Gebäude reicht ein Zeitraum von ca. drei Wochen innerhalb einer für das Systemverhalten relevanten Zeitperiode (z. B. Übergangszeit) aus, um ausreichend Informationen über das Last- und Anlagenbetriebsverhalten zu sammeln. Für das Lastverhalten sind beispielsweise der thermische und elektrische Verbrauch charakteristisch, deren Verläufe an-

schließlich durch die Analysesoftware auf einen gesamten Jahreszyklus hochgerechnet werden. Daraus wird ein analytisches Modell des Lastverhalten erzeugt, welches das spezifische Nutzerverhalten in dem Gebäude gesamtheitlich abbildet. Für das Betriebsverhalten der gesamten Anlagentechnik werden Größen wie die Erzeugungsleistung, Anlaufvorgänge oder Speichertemperaturen aufgenommen und daraus in der Analysesoftware Parameter extrahiert, die anschließend in ein Anlagenmodell überführt werden, welches das gesamte Versorgungssystem darstellt.

Diese Modelle werden zu einem Gesamtmodell zusammengefasst, mit dem das gesamte Gebäude inklusive Versorgungssystem bewertet werden kann. Diese können wiederum zu Quartieren aggregiert werden, um auch dort Bewertungen vorzunehmen. Zunächst wird aus der Bewertung abgeleitet, ob Änderungen im Anlagensystem innerhalb des Gebäudes oder des Quartiers sinnvoll sind. Anschließend wird durch die Software das Flexibilitätspotenzial des Versorgungssystems bestimmt und dafür automatisiert optimierte Fahrpläne abgeleitet.

Das gesamte Framework ist schematisch in Bild 1 dargestellt.

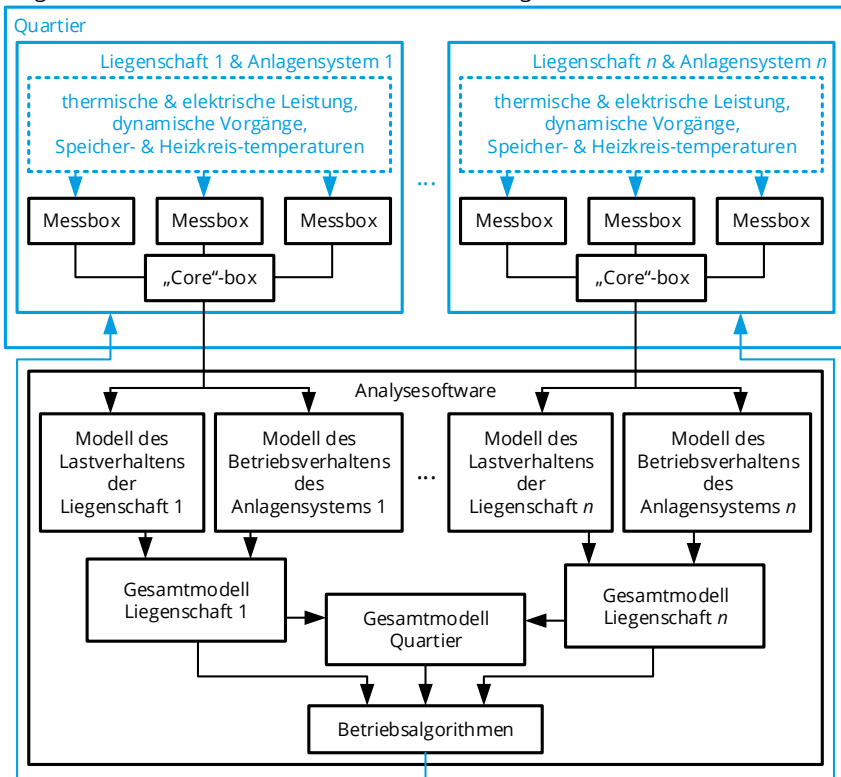


Bild 1: Schematische Darstellung des Frameworks



Maximilian Schmidt, Dipl.-Ing.
Anwendung Affiner Arithmetik zur
Bewertung von Unsicherheiten bei der
Zustandsidentifikation von
Verteilnetzen

Gefördert durch:



Eine adäquate Berücksichtigung von Unsicherheiten bei der Berechnung elektrischer Größen ist entscheidend für die Aussagekraft der gewonnenen Ergebnisse. Häufig werden probabilistische Methoden zur Unsicherheitsbewertung herangezogen, z. B. Gauß'sches Rauschen zur Beschreibung von Messunsicherheit. In praktischen Anwendungen kann jedoch oftmals die tatsächliche Verteilungsfunktion der Unsicherheit nicht bestimmt werden. Liegen hingegen Informationen zum Wertebereich der möglichen Schwankungsbreite einer Größe vor, z. B. in Form von Messgenauigkeiten, empfiehlt sich eine deterministische Beschreibung der Unsicherheit mittels Intervalle. Eine Erweiterung der klassischen Intervallrechnung ist die s. g. Affine Arithmetik, ein selbst-validierendes Berechnungsmodell aus dem Bereich des *Reliable Computing* [1]. Eine affine Variable $\langle y \rangle$ wird hierbei als Linearkombination globaler Unsicherheitsterme ϵ_i wie folgt beschrieben:

$$\langle y \rangle = y_{\text{mid}} + y_{e1}\epsilon_1 + y_{e2}\epsilon_2 + \dots + y_{en}\epsilon_n, \quad \forall y_{ei} \in \mathbb{R}, \epsilon_i \in [-1,1] \quad (1)$$

Dabei ist y_{mid} der Mittelpunkt und y_{ei} der Unsicherheitskoeffizient i zum Unsicherheitsterm ϵ_i , welcher dem Intervall $[-1,1]$ angehört. Jeder Unsicherheitsterm ist als symbolische Größe zu verstehen und wird jeweils einer Unsicherheitsquelle zugeordnet.

Teilen sich zwei affine Variablen Unsicherheitsterme, so sind sie von den selben Unsicherheitsquellen beeinflusst. Für affine Variablen werden die Grundrechenarten neu definiert. Affine Grundoperationen, wie die Skalarmultiplikation, Addition und Subtraktion, bewirken lediglich ein Neuordnen von Unsicherheitstermen und -koeffizienten. Nicht-affine Operationen, wie z. B. Multiplikation, quadratische oder trigonometrische Funktionen, werden über geeignete affine Approximationen unter Einführung eines neuen Unsicherheitsterms abgebildet. Die Struktur einer affinen Variable impliziert, dass lineare Korrelationen zu Unsicherheitsquellen während der Berechnung fortgeschrieben werden. Affine Variablen besitzen demnach ein Gedächtnis sowohl über lineare Abhängigkeiten als auch über die eingeprägte Unsicherheit von nicht-linearen Operationen.

Im Kontext der Zustandsidentifikation von Verteilnetzen stellen nicht gemessene Netzknoten die wesentlichen Quellen von Unsicherheit dar. Eine Netzzustandsgröße lässt sich demzufolge als affine Kombination der Knotenleistungsunsicherheiten schreiben:

$$\langle x \rangle = x_{\text{mid}} + \sum_{i=1}^p x_{ei}^P \epsilon_{Pi} + \sum_{i=1}^p x_{ei}^Q \epsilon_{Qi} \quad (2)$$

Dabei beschreiben die Unsicherheitsterme ϵ_{Pi} und ϵ_{Qi} die Wirk- und Blindleistungsunsicherheit des nicht gemessenen Netzknotens i . Bei n Zustandsgrößen, die den Systemzustand eindeutig kennzeichnen, und p nicht gemessenen Netzknoten folgt in Matrix-Darstellung nachfolgende affine Form des Zustandsvektors:

$$\begin{bmatrix} \langle x_1 \rangle \\ \vdots \\ \langle x_n \rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{\text{mid}1} \\ \vdots \\ x_{\text{mid}n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{e11}^P & \cdots & x_{e1p}^P \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{en1}^P & \cdots & x_{enp}^P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{p1} \\ \vdots \\ \epsilon_{pp} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{e11}^Q & \cdots & x_{e1p}^Q \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{en1}^Q & \cdots & x_{enp}^Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{q1} \\ \vdots \\ \epsilon_{qp} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Der Vektor der Mittelpunkte $\mathbf{x}_{\text{mid}} = [x_{\text{mid}1} \ \cdots \ x_{\text{mid}n}]^T$ wird über eine Lastflussrechnung mit den Mittelpunktswerten der Leistungsunsicherheit berechnet. Die Matrizen der Unsicherheitskoeffizienten folgen aus einer Sensitivitätsanalyse im Entwicklungspunkt $\mathbf{x}_{\text{mid}}$.

Der funktionale Zusammenhang zwischen einer beliebigen Prozessgröße z und dem Zustandsvektor $\mathbf{x}$ ist über die Funktion $h(\mathbf{x}) = z$ gegeben. Durch Einsetzen des affinen Zustandsvektors $\langle \mathbf{x} \rangle$ nach Gleichung (3) und unter Anwendung Affiner Arithmetik kann eine affine Approximation h^a der jeweiligen Prozessgröße berechnet werden:

$$h^a(\langle \mathbf{x} \rangle) = h_{\text{mid}} + \mathbf{h}_e \boldsymbol{\epsilon} + \mathbf{h}_e^{\text{na}} \boldsymbol{\epsilon}^{\text{na}} \quad (4)$$

Dabei beschreibt $\mathbf{h}_e$ den Zusammenhang zwischen der Prozessgröße und den Unsicherheitstermen $\boldsymbol{\epsilon} = [\epsilon_p^T \ \epsilon_q^T]^T$. Der letzte Summand in Gleichung (4) berücksichtigt zusätzliche Terme, die durch nicht-affine Operationen entstehen. Mit Hilfe des beschriebenen Modells können Aussagen darüber getroffen werden, wie sich Unsicherheiten nicht gemessener Netzknoten auf andere Prozessgrößen, wie bspw. der Leistungsfluss auf einer Leitung oder die Knotenspannung, auswirken.

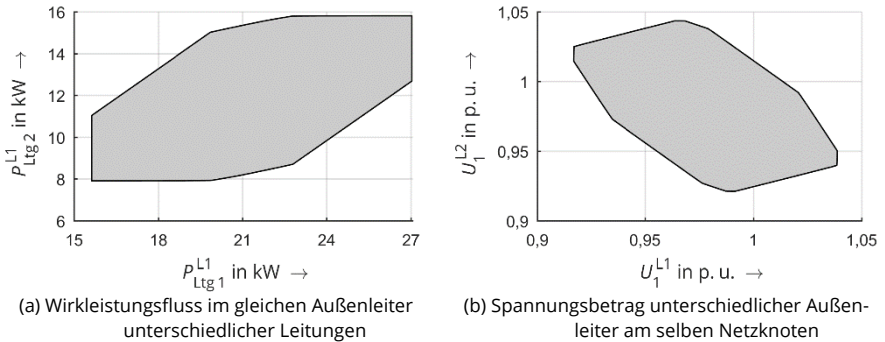


Bild 1: Gemeinsamer Unsicherheitsbereich von zwei affinen Variablen

Bild 1 a) zeigt exemplarisch den gemeinsamen Unsicherheitsbereich der Wirkleistungsflüsse unterschiedlicher Leitungen eines Niederspannungsnetzes im gleichen Außenleiter. Da ein funktionaler Zusammenhang zwischen den Leistungen besteht, wird der mögliche Wertebereich an den Intervallgrenzen eingeschränkt. In Bild 1 b) ist der gemeinsame Unsicherheitsbereich der Spannungsbeträge unterschiedlicher Außenleiter eines Netzknotens dargestellt. Die induktive Verkopplung der Außenleiter spiegelt sich im möglichen Wertebereich der Spannungen wider. Ein hoher Leistungsfall in einem Außenleiter ist durch einen hohen Leistungsfluss im selben begründet. Dieser wiederum bewirkt eine Spannungserhöhung in den benachbarten Leitern.

[1] J. Stolfi, L. H. De Figueiredo. *Self-Validated Numerical Methods and Applications*. Brazilian Mathematics Colloquium monographs, IMPA/CNPq, 1998.



Jens Werner, Dipl.-Ing.
Combined Hybrid Energy Systems
(CHES)
von der Forschung ins Startup

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Energiewende führt zu einer vollständigen Umgestaltung des Energieversorgungssystems. Neben dem Atomausstieg sowie der Abschaltung erster Braunkohlekraftwerke werden die nächsten Jahre insbesondere durch den Trend der Dezentralisierung geprägt sein. Dieser Trend wird getrieben durch die Kopplung der Sektoren Elektrizität – Wärme – Gas – Mobilität. Technisch umgesetzt wird die Sektorkopplung insbesondere mit Anlagen sehr kleiner elektrischer Leistung, insbesondere Wärmepumpen sind hier zu nennen. In den nächsten Jahren wird weiterhin mit der Zunahme an Elektrofahrzeugen, brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen aber auch stationären Brennstoffzellen für die Wärmebereitstellung gerechnet. Diese Anlagen sollen zukünftig verstärkt koordiniert werden, um zum einen diese in den Energiemarkt zu integrieren und zum anderen die momentane Netzauslastung beim Anlagenbetrieb zu berücksichtigen. Als technische Lösung für die Koordination können Virtuelle Kraftwerke (VK) eingesetzt werden.

Die heutigen technischen Lösungen für VK können aktuell Anlagen ab einer elektr. Leistung von 100 kW wirtschaftlich einbinden. Insbesondere die hohen Kosten für die Integration von Anlagen sowie die fehlende ganzheitliche Optimierung in Folge der zentralistischen Architektur sind wesentliche Gründe dafür, dass diese Leistungsgrenze nur schwierig weiter gesenkt werden kann.

Durch eine vollständige neue Systemarchitektur für VK hat sich das Team CHES das Ziel gesetzt, insbesondere die Kleinstanlagen wirtschaftlich in das VK einzubinden und hierfür technische Lösungen zur Produktreife zu bringen. Hierzu wird der Grundgedanke der Energiewende aufgegriffen, die Dezentralisierung, und auf die Steuer- und Regelarchitektur für Virtuelle Kraftwerke überführt. Die Systemarchitektur basiert darauf, dass Intelligenz aus der Zentrale hin zu den Anlagen verlagert wird. Dadurch können die wesentlichen Anforderungen an das VK der Zukunft gem. Bild 1 gelöst werden. Nachfolgend werden diese detaillierter erläutert und der Ansatz von CHES aufgezeigt.



Bild 1: Anforderungen an das Virtuelle Kraftwerk der Zukunft

Technologieoffenheit: Heutige VK erfordern es, dass ein möglichst genaues Modell der Anlage für Steuer- und Regelzwecke hinterlegt ist. Dies erfordert ein hohes Maß an Konfiguration für jede einzelne Anlage. Die neue Architektur hingegen abstrahiert die Anlagen so, dass die Einbindung in das VK unabhängig von der Anlagentechnologie ist. Mittels Methoden des Maschinellen Lernens können zusätzlich die relevanten Anlagenparameter bestimmt werden.

Berücksichtigung von Restriktionen: Anlagen großer Bemessungsleistung sind überlicherweise gut planbar, da nur wenige Restriktionen für den Anlagenbetrieb existieren. Die zukünftig eingesetzten Technologien hingegen sind von einer Vielzahl von Restriktionen geprägt, z. B. Wärmebedarf oder Mobilitätsbedarf. Das Team CHES hat eine Methodik entwickelt, mit der für die nächsten Tage und unabhängig von der spezifischen Restriktion durch die Zentrale eine Einsatzplanung einfach und mit geringem Rechenaufwand durchgeführt werden kann.

Hohe Skalierbarkeit, geringer Kommunikationsaufwand: Die Absatzprognose für Wärmepumpen und Brennstoffzellen zeigen für die Mitte des dritten Jahrzehnts einen jährlichen Absatz in sechsstelliger Höhe. Die Aggregation sämtlicher Restriktionen zu Planungskriterien ermöglicht diese Skalierbarkeit. Gleichzeitig muss der Kommunikationsaufwand reduziert werden. Durch die Dezentralisierung der Intelligenz können die Steuerboxen weitestgehend autonom arbeiten. Nur bei Abweichungen oder neu ermittelten Planungskriterien ist die eventbasierte Kommunikation mit der überlagerten Ebene notwendig.

Ganzheitliche Optimierung: Die heutigen Virtuellen Kraftwerke werden hauptsächlich für die Direktvermarktung genutzt. Dabei wird das bestehende Optimierungspotential nur bedingt erschlossen. Die Systemarchitektur von CHES erlaubt es, verschiedenste Anwendungsfälle simultan zu bedienen. Hierzu gehören insbesondere die Eigenbedarfsoptimierung, die Teilnahme an zukünftig entstehenden regionalen Flexibilitätsmärkten sowie die Börsen-/Regelleistungsvermarktung. Erst dadurch können auch die Kleinstanlagen wirtschaftlich in ein VK eingebunden werden.

Die Systemarchitektur setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, einer intelligenten Steuerbox mit innovativer Messtechnik und einem Koordinator. Ziel des EXIST-Forschungstransfers ist es, die Forschungsergebnisse in einsetzbare Produkte zu überführen, den „Proof of Concept“ in Feldtests nachzuweisen sowie ein nachhaltiges Geschäftsmodell zu entwickeln. Dieses sieht vor, dass das Team CHES mit seinem Systemverständnis von Strom und Wärme auf lokaler, regionaler und überregionaler Ebene als Partner für Energieversorger, Stadtwerke oder auch Energiecommunities auftreten möchten. Hierbei wirken wir entlang der kompletten Bedarfskette im Bereich der Beratung und des Engineering eines geeigneten VK-Systems, der Umsetzung bis zur Analyse des Anlagenbetriebsverhaltens.

3.1.2 Publikationen

Poster

Liebermann, C.; Meyer, J.; Schegner, P.; Kleemann, M.; Grzegorz, R.:
Vergleich und Bewertung der Distanzberechnung für Leiter-Erde-Schleifen (kE-Faktor).
FNN/ETG-Tutorial Schutz- und Leittechnik 2018,
Berlin, 20.-21.02.2018

Meyer, J.; Schegner, P.; Hauschild, S.:
Fehlerortung auf gemischten Übertragungsstrecken.
FNN/ETG-Tutorial Schutz- und Leittechnik 2018,
Berlin, 20.-21.02.2018

Meyer, J.; Schegner, P.; Lindner, M.; Kühn, H.:
Anforderungen an den zeitlichen Verlauf des Kurzschlussstromes.
FNN/ETG-Tutorial Schutz- und Leittechnik 2018,
Berlin, 20.-21.02.2018

Palm, S.; Meyer, J.; Schegner, P.:
Einfluss des realen Lastverhaltens auf den Entkopplungsschutz bei Inselnetzbildung.
FNN/ETG-Tutorial Schutz- und Leittechnik 2018,
Berlin, 20.-21.02.2018

Schmidt, M.:
Projektvorstellung Serving.
2. Statusseminar Zukunftsfähige Stromnetze,
Berlin, 20.-21.11.2018

Vorträge

Bauer, H.:
Untersuchung eines tödlichen Geschehnisses in der Badewanne.
13. Sitzung des Ausschusses für Produktsicherheit (AfPS),
Dortmund, 15.05.2018

Bauer, H.:
Tod in der Badewanne – Messungen mit geerdeter Wanne.
89. Sitzung des VDE-Ausschusses Sicherheits- und Unfallforschung (SUF),
Frankfurt/Main, 30.08.2018

Domagk, M.:

Neue Ansätze und verbesserte Verfahren für die Niederspannung.

Abschlussworkshop Netzharmonie,

Berlin, 11.-12.09.2018

Domagk, M.; Safraghli, F.; Hoven, M.:

Netzweite Simulationen in exemplarischen Netzen.

Abschlussworkshop Netzharmonie,

Berlin, 11.-12.09.2018

Hoven, M.; Domagk, M.:

Einführung und relevante Modelle für Netzsimulationen.

Abschlussworkshop Netzharmonie,

Berlin, 11.-12.09.2018

Krahmer, S.:

Methoden der dynamischen Netzreduktion.

VDE AK Verteilnetze,

Leipzig, 16.-17.04.2018

Krahmer, S.:

Robuste Stabilitätskriterien für nichtlineare Spannungsregler (Q(U)) in Verteilungsnetzen.

VDE AK Verteilnetze,

Hamburg, 19.-20.11.2018

Liebermann, C.:

Varianten der Implement. des kE-Faktors im Distanzschutz & die Auswirkung auf Messunschärfe.

Dresdner Kreis,

Magdeburg, 20.03.2018

Meyer, J.:

Power Quality challenges in future distribution networks.

Workshop on Supraharmonics and future Power Quality challenges,

Guangzhou, China, 22.03.2018

Meyer, J.:

Concepts and challenges of coordinating emission between voltage levels.

18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP),

Ljubljana, Slowenien, 13.-16.05.2018

Meyer, J.:

Oberschwingungen, Flicker & Co.: Neues zu den Netzzrückwirkungen.

TAR Fachforum,

Hannover, 30./31.10.2018

Meyer, J.:

EMV und Power Quality im Kontext der Normung.

VSE Fachtagung: Versorgungsqualität (Stabilität, Verfügbarkeit und Qualität des Versorgungsnetzes),

Brunnen, Schweiz, 08.-09.11.2018

Schegner, P.:

Projektvorstellung Serving.

2. Statusseminar Zukunftsfähige Stromnetze,

Berlin, 20.-21.11.2018

Meyer, J., et al.:

Grund zur Sorge? Netzurückwirkungen von Elektrofahrzeugen am Beispiel von Labor- und Feldmessungen.

EW Medien und Kongresse: eMobility und Energiewende - Netzprobleme beherrschen,

Wien, Österreich, 23.-24.01.2018

Meyer, J., et al.:

Auswirkungen der großflächigen Integration von Elektromobilität und Photovoltaik auf die Netzqualität in Niederspannungsnetzen.

Fachtagung: Netzqualität und Stabilität in der elektrischen Energieverteilung,

Wohlen, Schweiz, 22.05.2018

Meyer, J.; et al.:

Measurement Issues and Prevailing Harmonic Current Emission.

IEEE PES General Meeting,

Portland, U.S.A., 05.-09.08.2018

Meyer, J.; et al.:

Integrated metrics of electric performance in the context of smart grids.

Workshop on Power Quality at UNIFEI,

Itajuba, Brasilien, 04.09.2018

Meyer, J.; Müller, S.:

Challenges and pitfalls of implementing harmonic simulations to study the impact of new technologies in low voltage networks.

18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP),

Ljubljana, Slowenien, 13.-16.05.2018

Meyer, J.; Müller, S.:

Application aspects of FDM for studying PV impact in LV networks.

IEEE PES General Meeting,

Portland, U.S.A., 05.-09.08.2018

Meyer, J.; et al.:

Power Quality challenges in future distribution networks (from a German perspective).

Seminar on Connection of Solar PV to LV networks,

Colombo, Sri Lanka, 16.07.2018

Meyer, J.; et al.:

Power Quality in Niederspannungsnetzen: Neue Gerätetechnologien, neue Herausforderungen.

9. Forum für Sachverständige,

Neumarkt, 05.-06.06.2018

Meyer, J.; Lindemann, A.:

Praxisfälle von Netzereignissen mit möglichen Auswirkungen auf das Verhalten von Schutzeinrichtungen.

FNN/ETG-Tutorial Schutz- und Leittechnik 2018,

Berlin, 20.-21.02.2018

Möller, F.:

Technische Regeln zur Beurteilung von Netzzrückwirkungen (D-A-CH-CZ) Ausgabe 3 - Spannungsunsymmetrie.

Power Quality Seminar,

Mannheim, 18.10.2018

Möller, F.:

Unsymmetrie in öffentlichen Verteilungsnetzen.

Fachtagung Netz und Technik,

Brunnen, Schweiz, 08.11.2018

Rasti, S.:

Combined Energy Lab - HiL-Testumgebung für μ KWK-Anlagen.

Workshop Echtzeitsimulation,

Karlsruhe, 27.-28.09.2018

Schegner, P.; Palm, S.:

Anforderungen neuer Energieversorgungskonzepte an Schutzsysteme und deren Prüfung.

Omicron Anwendertagung,

Berlin, 12.06.2018

Schegner, P.; Seifert, J.:

Digitalisierung in der Energietechnik - „National 5G Energy Hub“ - Einführung zukunfts-trächtiger Kommunikationsstrukturen.

Energy Saxony Summit,

Dresden, 18.09.2018

Schegner, P.; Kreutziger, S.:
Automatisierung in Mittel- und Niederspannungsnetzen.
5. LIESA-Kongress,
Saarbrücken, 29.10.2018

Schegner, P.; Palm, S.:
Energieversorgungskonzepte und deren Anforderungen an die Schutz- und Leittechnik.
ETG-CIRED-Workshop 2018,
Berlin, 13-14.11.2018

Schegner, P.; Schmidt, M.:
Serving - Service Plattform Verteilnetze.
Stromnetze der Zukunft,
Berlin, 20.-21.11.2018

Schegner, P.:
Energiewende.
Ringvorlesung "Schlüsselprobleme der Gesellschaft in der Lehrerbildung",
Dresden, 13.12.2018

Wenzlaff, K.:
New Methods for the Detection of High-current Arc Faults in Low-voltage Installations.
3rd International Symposium „Electricity and Safety in the 21st Century“,
Dresden, 05.-06.11.2018

Werner, J.:
Konzept und Ergebnisse der praktischen Erprobung der Sektorkopplung Strom-Wärme im Feldtest des Regionalen Virtuellen Kraftwerks.
4. Dialogplattform Power to Heat,
Berlin, 12.06.2018

Veröffentlichungen

Bauer, H.:
Isolationskoordination und Überspannungsschutz.
Tagung HdT Hochspannungsschaltanlagen,
Dresden, 19.-20.11.2018

Blanco, A.M.; Gupta, M.; Gil de Castro, A.; Rönnberg, S.; Meyer, J.:
Impact of flat-top voltage waveform distortion on harmonic current emission and summation of electronic household appliances.
International Conference on Renewable Energies and Power Quality,
Salamanca, Spanien, 21.-23.03.2018

Caicedo, J.; Romero, A.; Zini, H.; Langella, R.; Meyer, J.; Watson, N.:
Impact of Reference Conditions on the Frequency Coupling Matrix of a Plug-in Electric Vehicle Charger.

18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP),
Ljubljana, Slowenien, 13.-16.05.2018

Darmawardana, D.; Perera, S.; Robinson, D.; Ciufu, P.; Meyer, J.; Jayatunga, U.:
High Frequency Emissions (Supraharmonics) from Small, Grid-tied, Photovoltaic Inverters Based on the Inverter Topology.

18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP),
Ljubljana, Slowenien, 13.-16.05.2018

Darmawardana, D.; Perera, S.; Robinson, D.; Ciufu, P.; Meyer, J.; Klatt, M.; Jayatunga, U.:
A Digital Zero-Phase Filter for Measuring High Frequency Emissions (Supraharmonics) in Electrical Distribution Networks.

Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC),
Auckland, Neuseeland, 27.-30.11.2018

Gil de Castro, A.; Medina-Garcia, R.; Rönnberg, S.K.; Blanco, A.M.; Meyer, J.:
Differences in the performance between CFL and LED lamps under different voltage distortions.

18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP),
Ljubljana, Slowenien, 13.-16.05.2018

Greverner, A.; Meyer, J.; Rönnberg, S.:
Comparison of measurement methods for the frequency range 2 – 150 kHz (supraharmonics).

IEEE 9th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS),
Bologna, Italien, 26.-28.09.2018

Hess, T.; Schegner, P.:
Definition and Calculation of Power Limit Values for Distribution Grids – Basics of Comprehensive Demand Side Management.

IEEH PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe 2018),
Sarajevo, Bosnien und Herzegowina, 21.-25.10.2018

Jäschke, C.; Schegner, P.; Seifert, J.:
Design of an Efficient Magnetic Circuit for a Magneto-Caloric Air-Conditioning System.

IEEE International Magnetism Conference (Intermag 2018),
Singapur, 23.-27.04.2018

Kasper, B.; Bauer, H.:
Death in Bathtub – Do Standards Have to be Changed?

3rd International Symposium „Electricity and Safety in the 21st Century“,
Dresden, 05.-06.11.2018

Körner, P.M.; Stiegler, R.; Meyer, J.; Wohlfahrt, T.; Waniek, C.; Myrzik, J.:
Acoustic Noise of Massmarket Equipment caused by Supraharmonics in the Frequency Range 2 to 20 kHz.

18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP),
Ljubljana, Slowenien, 13.-16.05.2018

Krahmer, S.; Saciak, A.; Winkler, J.; Schegner, P.; Röbenack, K.:
On Robust Stability Criteria for Nonlinear Voltage Controllers in Electrical Supply Networks.
20th Power Systems Computation Conference (PSCC 2018),
Dublin, Irland, 11.-15.06.2018

Krahmer, S.; von Haken, A.; Weidner, J.; Schegner, P.:
Anwendung von Methoden der dynamischen Netzreduktion - Abbildung von 110-kV-Netzen für die Untersuchung der transienten Stabilität im Übertragungsnetz.
15. Symposium Energieinnovation (EnInnov 2018),
Graz, Österreich, 14.-16.02.2018

Kreutziger, M.; Schegner, P.; Wende-von-Berg, S.; Braun, M.; Bornhorst, N.:
Reactive Power Management of Distributed Generators for Selective Voltage Optimization in 110-kV-Subtransmission Grids.
Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems – NEIS 2018,
Hamburg, 20.-21.09.2018

Meyer, J.:
Anforderungen an Stromwandler für Schutzzwecke.
Netzschutz – Das Magazin für Schutztechnik, 03/2018,
Wien, Österreich, 01.09.2018

Meyer, J.:
Dimensionierung von Stromwandlern für Schutzzwecke.
Netzschutz – Das Magazin für Schutztechnik, 03/2018,
Wien, Österreich, 01.09.2018

Langella, R.; Testa, A.; Caicedo, J.; Romero, A.; Zini, H.; Meyer, J.; Watson, N.:
On the Use of Fourier Descriptors for the Assessment of Frequency Coupling Matrices of Power Electronic Devices.
18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP),
Ljubljana, Slowenien, 13.-16.05.2018

Mendes, T.M.; Duque C.A.; Manso Silva, L.R.; Ferreira, D.; Ribeiro, P.:
Supraharmonics Analysis using Subsampling.
18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP),
Ljubljana, Slowenien, 13.-16.05.2018

Meyer, J.; Khokhlov, V; Klatt, M.; Blum, J.; Waniek, C.; Wohlfahrt, T.; Myrzik, J.:
Overview and Classification of Interferences in the Frequency Range 2-150 kHz (Supraharmonics).
SPEEDAM 2018,
Amalfi, Italien, 20.-22.06.2018

Möller, F.; Meyer, J.:
Survey on Emission Characteristic of the Symmetrical Components of Voltage and Current in LV Grids.
18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP),
Ljubljana, Slowenien, 13.-16.05.2018

Müller, S.; Meyer, J.; Myrzik, J.; Langella, R.; Testa, A.; Xu, X.; Collin, A.; Djokic, S.:
Aggregate Harmonic Fingerprint Models of PV Inverters. Part 2: Operation of Parallel-Connected Units.
18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP),
Ljubljana, Slowenien, 13.-16.05.2018

Nilges, M.; Schegner, P.:
Influence of the Winding Geometry and its Materials on the Resonance Behavior of Transformer Coils.
IEEE International Magnetism Conference (Intermag 2018),
Singapur, 23.-27.04.2018

Nilges, M.; Schegner, P.:
Influence of RC snubbers on the Steepness of Switching Transients caused by Vacuum Circuit Breakers.
IEEE PES General Meeting,
Portland, OR, USA, 05.-09.08.2018

Palm, S.; Schegner, P.:
Vergleichskriterien zur objektiven Bewertung von Inselnetzdetektionsverfahren im Verteilnetz.
15. Symposium Energieinnovation (EnInnov 2018),
Graz, Österreich, 14.-16.02.2018

Peterson, B; Rens, J.; Botha, G.; Blanco, A.; Meyer, J.; Desmet, J.:
Impact of Aggregation Interval on Harmonic Phase Angle Measurements.
IEEE 9th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS),
Bologna, Italien, 26.-28.09.2018

Pieper, C.; Hess, T.; Henoch, J.:
Renewable, Cellular Energy Clusters Providing Ancillary Services.
Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems – NEIS 2018,
Hamburg, 20.-21.9.2018

Pourarab, M.; Meyer, J.; Spelko, A.; Papic, I.:

Impact of variations in the utility side on the harmonic contribution of customer installations.

IEEE PES General Meeting,

Portland, OR, USA, 05.-09.08.2018

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

Multi-Stage Constrained State Identification in Distribution Grids Using Uncertainty Intervals.

20th Power Systems Computation Conference (PSCC 2018),

Dublin, Irland, 11.-15.06.2018

Seifert, J.; Seidel, P.; Werner, J.; Schegner, P.:

Vernetzte dezentrale energetische Erzeugungseinheiten - Ergebnisse eines Feldtests.

gwf Gas+Energie,

Essen, November 2018

Seifert, J.; Werner, J.; Seidel, P.; Wolfgang, K. E.; Janssen, R.; Schumacher, M.:

Regionale virtuelle Kraftwerke Mikro-KWK-Systeme für eine effiziente Netzinfrastuktur.

EW Magazin, 02/2018,

Berlin

Werner, J.; Seifert, J.; Seidel, P.:

Digitalisierung in der Gebäudeenergietechnik.

IKZ Haustechnik,

Arnsberg, 11.10.2018

Xu, X.; Collin, A.; Djokic, S.; Müller, S.; Meyer, J.; Myzik, J.; Langella, R.; Testa, A.:

Aggregate Harmonic Fingerprint Models of PV Inverters. Part 1: Operation at Different Powers.

18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP),

Ljubljana, Slowenien, 13.-16.05.2018

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

A Feature-Based Method for Automatic Anomaly Identification in Power Quality Measurements.

International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS),

Boise, U.S.A., 24.06.2018

Patente

Sprecher Automation GmbH,

Erfinder: Liebermann, C.; Meyer, J.; Kleemann, M.:

Verfahren zur Steuerung eines Distanzschutzrelais durch Erkennung von Leiter-Erde-Fehlern.

Österreichisches Patent AT 519450,

Erteilt am 15.07.2018

3.2 Lehrstuhl Hochspannungs- und Hochstromtechnik

3.2.1 Forschungsschwerpunkte und Forschungsprojekte

Elektrische Kontakte und Verbindungen

Untersuchen der Alterung von ruhenden, stromführenden Verbindungen in der Elektrotechnik seit 40 Jahren:

Grundlagenforschung

- Untersuchen der physikalischen Vorgänge der Alterung
- Erarbeiten von Grundlagen zur Lebensdauerprognose
- Bestimmen der elektrischen und thermischen Material- und Kontaktwiderstände
- Wirkung von Beschichtungen auf das Kontakt- und Langzeitverhalten
- Modellieren und Berechnen der Alterung stromführender Kontakte und Verbindungen

Angewandte Forschung

- Qualifizieren neuer Werkstoffe für die Konstruktion von Verbindungen
- Langzeitverhalten von gG-Sicherungen bei erhöhter Temperatur
- Grenztemperaturen von Verbindungen für Freileitungs- und Hochtemperatur-Freileitungsseilen sowie Kabelgarnituren
- Betriebs- und Langzeitverhalten von Steckverbindungen mit federnden Kontaktelementen
- Elektrische Eigenschaften umformtechnischer Verbindungen insbesondere für die Anwendung in der E-Mobilität
- Weiterentwickeln von Konstruktionsrichtlinien und Verfahren für elektrische Alterungsprüfungen

Hochspannungstechnik

Untersuchen von flüssigen, festen und gasförmigen Isolierstoffen:

Grundlagenforschung

- Durch- und Überslagspannung von Isolierwerkstoffen und deren Systemen
- Strom-Zeit-Verhalten von Isolierwerkstoffen und Systemen als Antwort auf impulsförmige, harmonische oder stete Spannungsbelastung
- Prüf- und Messtechnik zur experimentellen Erfassung der physikalischen Größen
- Statistische Bewertung der physikalischen Prozesse
- Elektrische Feldstärkeverteilung unter Berücksichtigung von Raumladungen

Angewandte Forschung

- Bestimmung der Durchschlagfestigkeit von Isolierpapieren
- Zustandsbewertung isolierender Seile für AuS
- Leitfähigkeitsmessung von Isolierölen
- Bohren harter Gesteine mit Impulsspannung
- Teilentladungsmessung bei Gleich- und Wechselspannung an GIS
- Lebensdaueruntersuchungen an Isoliersystemen für rotierende Hochspannungsmaschinen
- Einfluss hoher Frequenzen auf das Isoliervermögen

Strombelastbarkeit und Erwärmung

Untersuchen der Strombelastbarkeit und Erwärmung elektrischer Betriebsmittel:

Grundlagenforschung

- Wärmequellen und Wärmeübertragung in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern
- Stromdichteverteilung in Mehrleiteranordnungen bei Wechsel- und Drehstrom unter Berücksichtigung des Proximity- und des Skin-Effekts
- Temperaturabhängigkeit von Widerständen elektrischer Kontakte und Verbindungen
- Messen von Temperaturen auf Metall- und Kunststoffoberflächen
- Berechnen des Wärmeübergangs durch Konvektion in Gasen und Flüssigkeiten mit CFD

Angewandte Forschung

- Berechnen des thermischen Verhaltens von Betriebsmitteln der Elektrotechnik
- Dimensionieren der Leiterquerschnitte von Hochstromanlagen
- Optimieren der Anordnung von Leitern z. B. in Armaturen
- Entwickeln rechnerischer Nachweis der Erwärmung von Energieverleieranlagen
- Koppeln der Methoden und Werkzeuge zum Berechnen der Wärmeübertragung und Optimieren von Wärmeflüssen

Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Elektrische Kontakte und Verbindungen“



Christian Hildmann, Dr.-Ing.
**Einfluss der Vorgaben von Verfahren
zum Prüfen stromführender Armaturen
für Freileitungsseile auf deren
elektrisch-thermische Beanspruchung**

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

FKZ: 03TNG009A

Zum Prüfen der elektrischen Funktion stromführender Verbindungen für Freileitungsarmaturen schreiben die betreffenden Standards in der Regel elektrisch-thermische Wechsellastprüfungen vor. In diesen Prüfverfahren wird die Belastung abhängig von der Art der Armatur oder der Anzahl der Lastwechsel festgelegt. Dabei werden jeweils individuelle Temperatur-Zeit-Kriterien für den Heiz- sowie den Kühlzyklus vorgegeben. Die Vorgaben der elektrisch-thermischen Belastung erfolgen in der Regel anhand der Temperatur des Leiterseils. Folglich ist die Temperatur an den Prüflingen selbst von den weiteren Randbedingungen der Prüfung sowie von ihren Eigenschaften abhängig. Die resultierende Beanspruchung der Prüflinge ist bei verschiedenen Prüfverfahren spezifisch und führt gegebenenfalls zu einer unterschiedlichen Alterung der stromführenden Armaturen. Zielstellung der Untersuchungen war es, die Beanspruchung der relevanten Prüfverfahren miteinander zu vergleichen. Dabei wurden die IEC 61284:1997, die ANSI C119.4:2011 und die VDE 0212-52:1991 betrachtet.

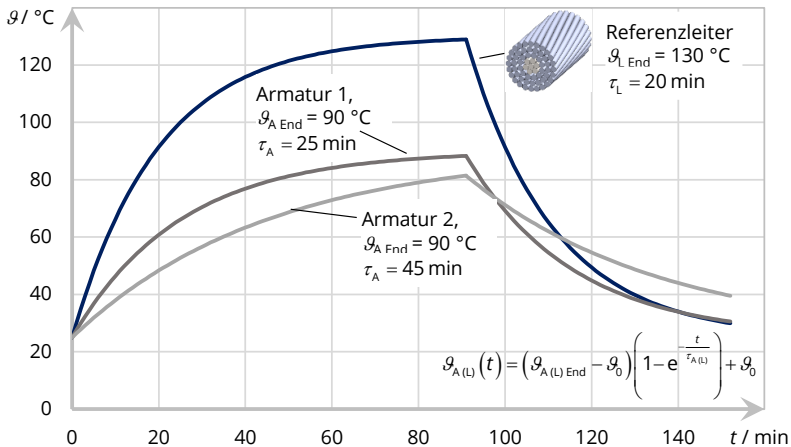


Bild 1: Temperaturverlauf eines Referenzleiters und zweier Armaturen mit unterschiedlicher Zeitkonstante bei Anwendung der Belastungskriterien aus der IEC 61284:1997

Mit den beschriebenen Belastungskriterien wurden exemplarisch Temperaturverläufe eines Referenzleiters und zweier Armaturen mit unterschiedlicher Zeitkonstante berechnet (Bild 1). Bei den Betrachtungen wurden Randbedingungen, wie die Übertemperatur des Referenzleiters und die Umgebungstemperatur einheitlich gewählt. Als vergleichendes Kriterium für die thermische Beanspruchung in den Prüfverfahren wurde die Zeitdauer berechnet, bei der die Armatur eine Temperatur ϑ_A im Bereich $\vartheta_{A\text{end}} - 10\text{ K} \leq \vartheta_A \leq \vartheta_{A\text{end}}$ hat (Bild 2).

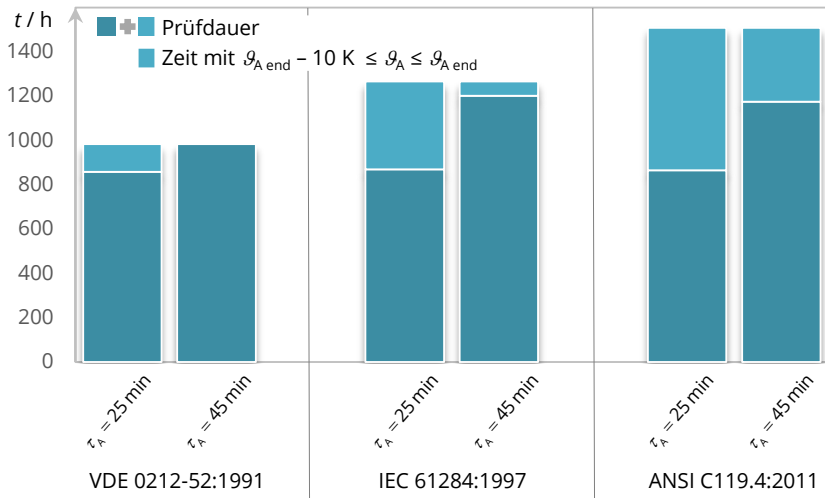


Bild 2: Vergleich der Prüfdauer mit der Zeit, in der die Temperatur der Armatur im Bereich $\vartheta_{A\text{end}} - 10\text{ K} \leq \vartheta_A \leq \vartheta_{A\text{end}}$ ist für drei Prüfprozeduren abhängig von der Zeitkonstante der Armatur

Grundlage für dieses Kriterium war es, die wirkenden Alterungsmechanismen auf Basis des Arrheniusgesetzes zu bewerten. Die thermische Beanspruchung der Armaturen im Prüfverfahren der VDE 0212-52:91 war damit am geringsten (Bild 2). Die IEC 61284:1997 und die ANSI C119.4:2011 fordern längere Heizzyklen als die VDE 0212-52:91, so dass auch die Dauer der Beanspruchung für die Armaturen länger wird. Insbesondere bei Armaturen mit großer thermischer Zeitkonstante ist die Dauer der Beanspruchung bei allen Prüfverfahren deutlich geringer als bei Armaturen mit einer geringen thermischen Zeitkonstante. Die Belastung unterscheidet sich, obwohl einheitliche Prüfkriterien für die Armaturen angewendet wurden, aufgrund der unterschiedlichen Bauformen. Verglichen mit der gesamten Prüfdauer ist die Zeitdauer der thermischen Beanspruchung bei allen Prüfungen mit Wechsellast gering. Im Hinblick auf zum Teil sehr großvolumige Armaturen für Hochtemperatur-Freileitungsseile muss dies zukünftig noch stärker berücksichtigt werden.

[1] IEC 61284:1997. Freileitungen - Anforderungen und Prüfungen für Armaturen über 45 kV.

[2] ANSI C119.4:2011. Electric Connectors.

[3] VDE 0212-52:1991. Armaturen für Freileitungen und Schaltanlagen.



Toni Israel, Dipl.-Ing.
Berechnungsmodelle für das Verhalten
von silberbeschichteten Hochstrom-
Steckverbindungen im Fehlerfall

Steck- und Gleitverbindungen werden benötigt für ortsveränderliche Betriebsmittel, um Trennstrecken in Schaltanlagen herzustellen oder zur Kompensation von thermischen Dehnungen. Durch die im Vergleich zu den Anschlussleitern kleinen Querschnitte der Kontaktelemente sind diese bei Kurzschlüssen besonders hoch beansprucht (Bild 1).

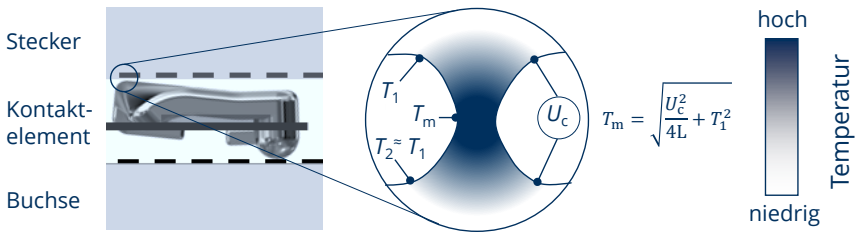


Bild 1: Berechnung der Kontaktpunkttemperatur eines Hochstrom-Steckverbinders

Am IEEH sind mehrere Kurzschluss-Versuchsstände zur Prüfung mit bis zu 30 kA für 1 s und 70 kA Stoßstrom entstanden. Mit diesen wurden Erkenntnisse gewonnen, um ein am Lehrstuhl entwickeltes Berechnungsmodell zu erweitern [1]. Insbesondere die Wirkung der Erwärmung und das Materialverhalten auf das Kontaktverhalten während der ersten Halbwelle eines Kurzschlusses, dem Stoßstrom, war dabei im Fokus (Bild 2 und Bild 3).

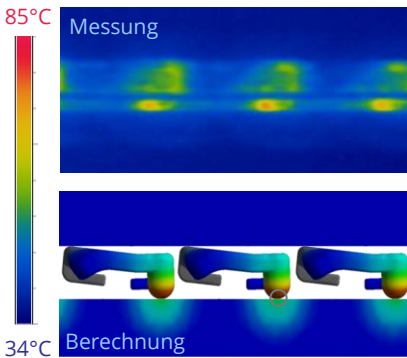


Bild 2: Temperaturverteilung während eines Stoßstroms mit $i_p = 12,9 \text{ kA}$

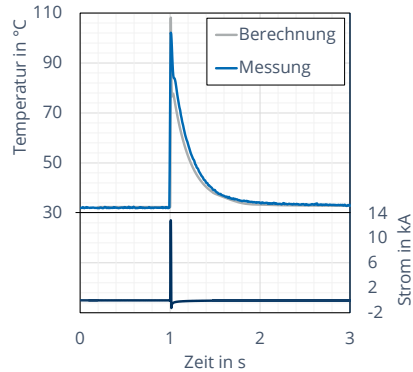


Bild 3: Verlauf der gemessenen und berechneten Oberflächentemperatur

Der Stoßstrom erwärmt vor allem die Kontaktpunkte zwischen Kontaktelement und den Anschlussleitern, das restliche Material kaum. Bei Temperaturen über 180 °C verringert sich die Härte der Silberbeschichtung und die Mikrokontakte vergrößern sich. Dadurch verringern sich der Kontaktwiderstand (Bild 4) und die erzeugte Verlustleistung.

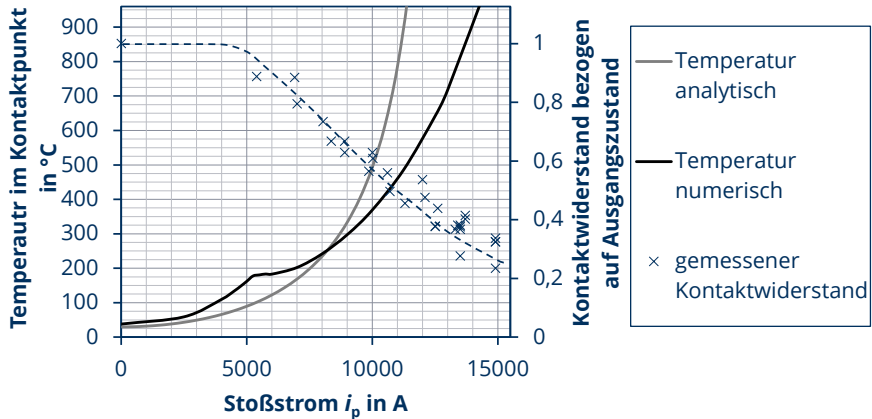


Bild 4: Berechnete Temperatur im Kontaktpunkt und gemessener Kontaktwiderstand

In den bekannten analytischen Abschätzungen ist dieses Verhalten nicht berücksichtigt. Zudem wird die Erwärmung der Anschlussleiter vernachlässigt. Dadurch werden die analytisch berechneten Kontakttemperaturen unterhalb der Entfestigungstemperatur zu gering und oberhalb zu hoch berechnet.

Tabelle 1: Übersicht verschiedener Berechnungsansätze

Modell	Schweißgrenzstrom in kA
analytisch	11,35
Slade 2016	12,2
IEEH 2018	12,8-14

Das weiterentwickelte Berechnungsmodell zeigt eine gute Übereinstimmung mit dem experimentell ermittelten Schweißgrenzstrom von (13...14) kA. Dieser ist allerdings stark vom Kontaktwiderstand und eventuellen Verunreinigungen abhängig, die aktuell nur bedingt von numerischen Berechnungsmodellen abgebildet werden können.

Das Verhalten während längerer Kurzschlussdauern ist in [1] detailliert beschrieben. Es zeigt sich, dass die Reduktion des Kontaktwiderstandes während der ersten Halbwelle entscheidend für die maximale Temperatur am Ende eines längeren Kurzschlusses ist.

Es ist geplant, die Versuche und Berechnungen am flachen Modellsteckverbinder mit Kurzschlussversuchen an Rundsteckverbindern zu verifizieren.

[1] T. Israel, S. Schlegel, S. Großmann, T. Kufner, G. Freudiger. *The Influence of Peak Current and ECR on the Transmission Performance of High Power Connectors during Faults*. International Conference on Electrical Contacts, Albuquerque, New Mexico, USA, 2018.



Christian Kühnel, Dipl.-Ing.
Untersuchungen zum Einfluss hoher thermischer Beanspruchung von NH-Sicherungseinsätzen (gG) im Normalbetrieb auf den Durchgangswiderstand und das Schaltverhalten im Fehlerfall

Gefördert durch:



NH-Sicherungseinsätze (gG) werden im Niederspannungsnetz in hoher Stückzahl zum Schutz elektrotechnischer Betriebsmittel vor Kurzschlussströmen und anhaltenden Überlastströmen eingesetzt. Neue Anforderungen an moderne Energieversorgungsnetze, vor allem im Rahmen der stetig zunehmenden Einspeisung regenerativer Energien, führen dabei zu einem sich wandelnden Belastungsprofil für NH-Sicherungseinsätze. Damit verbunden ist oftmals eine deutlich erhöhte thermische Beanspruchung der Schmelzleiter im Normalbetrieb, die zu einer beschleunigten Alterung der Schmelzleiter führen kann. Bisherige Untersuchungen zum Langzeit- und Betriebsverhalten von Schmelzleitern für NH-Sicherungseinsätze (gG) haben gezeigt, dass dabei vor allem die Funktion der Schmelzleiter im Bereich kleiner Überströme beeinträchtigt wird [1]. Verglichen mit dem Schaltverhalten im Neuzustand können dabei, abhängig von der thermischen Vorbeanspruchung der Schmelzleiter, sowohl Fehler durch ein frühzeitiges Fehlabschalten als auch stark verlängerte Schaltzeiten auftreten. Anhand der Versuchsergebnisse in einer Modellumgebung wurden erste Grenztemperaturen für die untersuchten Schmelzleiter hergeleitet. Aktuelle Untersuchungen haben zum Ziel, die in den Modelluntersuchungen hergeleiteten Grenztemperaturen in anwendungsbezogenen Versuchen mit realen Sicherungseinsätzen zu verifizieren und weiter zu konkretisieren. Dazu wurden sowohl Langzeitversuche mit NH-Sicherungseinsätzen bei Strombelastung und hoher thermischer Dauerbeanspruchung durchgeführt als auch der Einfluss auf das Schaltverhalten der gealterten Sicherungseinsätze im Bereich kleiner Überströme untersucht (Tabelle 1).

Tabelle 1: Untersuchte thermische Beanspruchung von NH-Sicherungseinsätzen (gG) im Normalbetrieb, basierend auf den Ergebnissen der Untersuchungen in der Modellumgebung

Typ	Grenztemperatur der Schmelzleiter in °C									
	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220
A	X	X								
B						X			X	
C			X			X				
D		X			X					

Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen:

- keine signifikanten Änderungen zum Neuzustand
- Probleme im Praxiseinsatz nicht ausgeschlossen
- zuverlässige Funktion nicht mehr gegeben

Es konnte bestätigt werden, dass bereits eine dauerhaft hohe thermische Beanspruchung unterhalb der Solidustemperatur der eingesetzten Lote zum frühzeitigen Ausfall der Sicherungseinsätze führen kann. Ein derartig frühzeitiger Ausfall führt im Vorfeld dabei nicht zu signifikant erhöhten Widerständen der Sicherungseinsätze, die eine Diagnose zulassen würden. Das ist maßgeblich darauf zurückzuführen, dass kritische Veränderungen im Bereich der Engstelle mit Lotdepot nur zu geringfügig höheren Widerständen im Vergleich zum Ausgangszustand führen (Bild 1). Des Weiteren sind diese Änderungen im Vergleich zum dominanten Anteil des Widerstands des Schmelzleiters in der Regel vernachlässigbar. Da Sicherungseinsätze oftmals mehrere parallele Schmelzleiter enthalten, kann der Anstieg des Widerstands in der Praxis messtechnisch in der Regel von außen nicht erfasst werden. Zuverlässig kann der Zustand eines Sicherungseinsatzes und dessen Funktion daher nur im Schaltversuch bewertet werden. Eine zerstörungsfreie Zustandsanalyse ist nicht möglich.

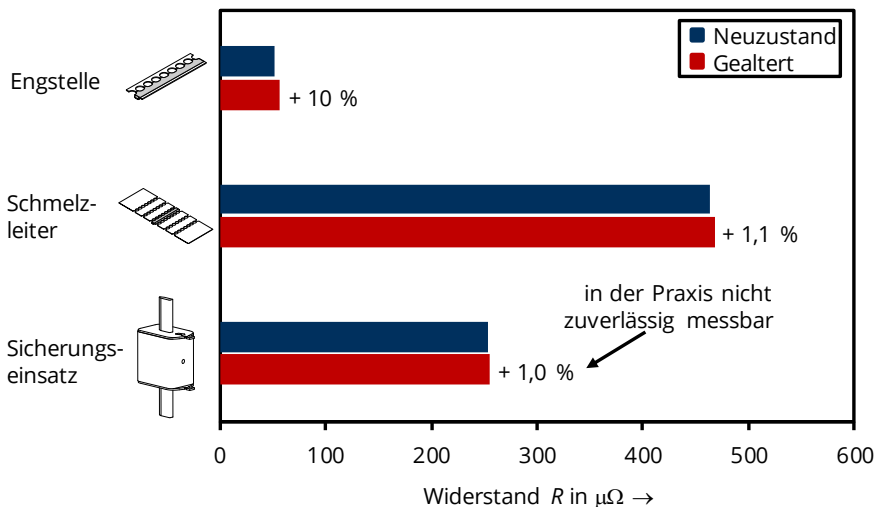


Bild 1: Einfluss einer kritischen Änderung des Widerstands der Engstelle mit Lotdepot ($\Delta R = +10\%$) auf den Durchgangswiderstand des Sicherungseinsatzes

Es wurde daher zusätzlich das Schaltverhalten der in den Langzeitversuchen untersuchten Sicherungseinsätze im Bereich kleiner Überströme untersucht, um die Grenztemperaturen für Schmelzleiter praktisch zu verifizieren. Gemeinsam mit Berechnungsmodellen zum Erwärmungsverhalten der Sicherungseinsätze bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen wird darüber hinaus die Angabe von Grenztemperaturen für das Sicherungsmesser möglich. Die Grenztemperatur des Sicherungsmessers ist eine überprüfbare Größe für einen langzeitstabilen Betrieb der NH-Sicherungseinsätze.

[1] C. Kühnel, S. Schlegel, S. Großmann. *Grenztemperaturen für NH-gG-Schmelzleiter im modernen Energieversorgungsnetz*. 24. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 2017.



Marcella Oberst, Dipl.-Ing.
**Einfluss von Diffusionsprozessen auf
 die Alterung stromtragender
 Verbindungen**

Gefördert durch:



Bundesministerium
 für Wirtschaft
 und Energie

aufgrund eines Beschlusses
 des Deutschen Bundestages

IGF-Vorhaben: 17EWBG

Beim Verzinnen von Leitern aus Aluminium wird eine Zwischenschicht aus Nickel auf den Grundwerkstoff aufgebracht, um die Haftung zu verbessern. So können die Leiter ohne eine abrasive Vorbehandlung z. B. mit Leitern aus Kupfer verbunden werden. Zwischen den einzelnen Beschichtungen können sich intermetallische Phasen (IMP) durch Interdiffusion bilden. Diese wirken sich auf Grund ihres höheren spezifischen elektrischen Widerstands negativ auf den Verbindungswiderstand aus. Bei der Wiedermontage einer gealterten Verbindung können sie dazu führen, dass die Beschichtung vom Grundwerkstoff abgerissen und durch ein schlechtes Kontaktverhalten schlimmstenfalls ein Ausfall verursacht wird. Bishe-
 riges Untersuchungen betrachteten die IMP im Ni-Sn-System insbesondere vor dem Hinter-
 grund der Lotverbindungen [1, 2]. Die Wachstumsgeschwindigkeit der IMP bei Temperatu-
 ren unterhalb der Schmelztemperatur von Zinn, wie sie in der Elektroenergietechnik vor-
 kommen, sind bisher unbekannt. Auch der spezifische elektrische Widerstand der Phasen,
 der sich mit den Temperaturen im Wachstumsprozess ändern kann, wurde bisher für Tem-
 peraturen < 200 °C nicht untersucht. Diese Parameter sollen im Rahmen des IGF-Vorhabens
 17EWBG bestimmt werden.

In Kooperation mit dem Forschungsinstitut Edelmetalle und Metallchemie (fem) in Schwä-
 bisch Gmünd wurden zunächst Aluminiumble-
 che galvanisch vernickelt und verzinkt und an-
 schließend am IEEH bei 105 °C und 140 °C im
 Wärmeschrank gelagert. Hauptsächlich wurde
 bei den untersuchten Temperaturen die
 Ni_3Sn_4 -Phase festgestellt, sowie teilweise die
 metastabile, stengelförmig wachsende NiSn_3 -
 Phase (Bild 1). Einzelne Proben wurden zu be-
 stimmten Zeitpunkten entnommen und an-
 schließend metallographisch untersucht. Da-
 bei wurde die Wachstumskonstante k und der
 Zeitexponent n bestimmt.

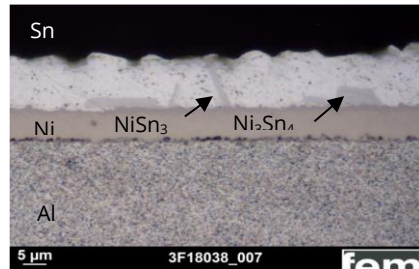


Bild 1 Intermetallische Phasen einer Al/Ni/Sn-
 Blechprobe nach 1.592 h bei 105 °C

$$d = (k \cdot t)^n \quad (1)$$

Für den Zeitexponenten wurde ein Wert von $n \approx 0,2$ bestimmt. Bei der Auswertung der
 Wachstumskonstanten k fiel auf, dass die Werte für die bei 105 °C gelagerten Proben nähe-
 rungsweise eine Gerade ergaben und bei den bei 140 °C gelagerten Proben nicht (Bild 2).
 Die Werte konnten in zwei Abschnitte mit unterschiedlichen Steigungen eingeteilt und ap-
 proximiert werden. Dies spricht dafür, dass sich der Diffusionsprozess ändert und bereits

nach relativ kurzer Zeit deutlich verlangsamt. Vergleichende Messungen an industriell beschichteten Stromschienen aus Aluminium mit einer Deckschicht aus Zinn und Zwischenschicht aus Nickel zeigten um ca. eine Größenordnung abweichende Werte für k . Ein möglicher Grund hierfür ist die Kornstruktur, die je nach galvanischem Bad und Parametern des Beschichtungsprozesses variiert. Außerdem denkbar wäre ein Einfluss der metastabilen NiSn_3 -Phase. Die Bedingungen für deren Entstehung wurden bisher noch nicht untersucht, beeinflussen aber sicherlich das Phasenwachstum im System.

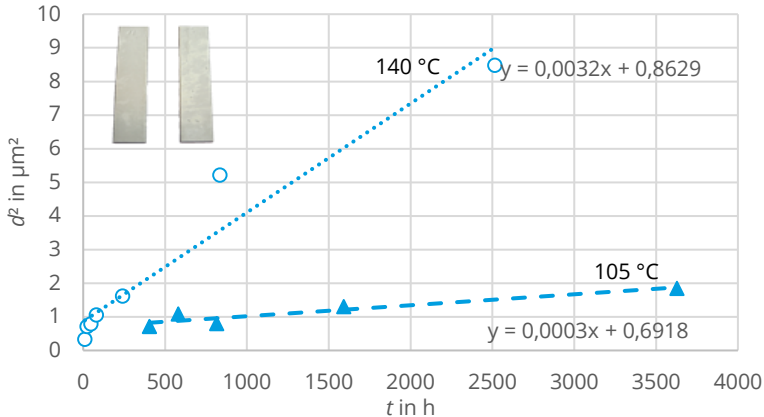


Bild 2: Bestimmen der Wachstumskonstanten k anhand von Al/Ni/Sn-Blechproben die im Wärmeschränk bei 105 °C bzw. 140 °C gelagert wurden

Neben den Wachstumsparametern soll der spezifische elektrische Widerstand der IMP bestimmt werden. Dafür wurden Glasträger (Bild 3) galvanisch mit Silber und Zinn beschichtet. Durch eine anschließende Wärmebehandlung konnten am fem phasenreine Proben hergestellt werden, die am IEEH mit einem speziell dafür gefertigten Versuchsaufbau untersucht wurden. Neben dem spezifischen elektrischen Widerstand der IMP wurde auch deren Temperaturbeiwert bestimmt.



Bild 3: Glasträger mit phasenreiner Probe zum Bestimmen des spez. elektr. Widerstands

Neben dem System Ni-Sn werden diese Untersuchungen auch für das System Ag-Sn durchgeführt. Die IMP zwischen diesen beiden Werkstoffen beeinflussen die Alterung von Schmelzsicherungen, die z. B. in Anlagen der Photovoltaik eingesetzt werden. Das Bestimmen der Eigenschaften der Phasen soll es ermöglichen, den Verlauf der Alterung von Sicherungseinsätzen besser abzuschätzen.

- [1] Y. Jeon, K. Paik. *Studies on Ni-Sn Intermetallic Compound and P-rich Ni Layer at the Electroless Nickel UBM-Solder Interface and Their Effects on Flip Chip Solder Joint Reliability*. Proc. of the 51st Electronic Components and Technology Conference, 29.05.-01.06.2001, Orlando, S. 1326-1332.
- [2] K. Chu, Y. Sohn., C. Moon. *A comparative study of Cu/Sn/Cu and Ni/Sn/Ni solder joints for long temperature stable transient liquid phase bonding*. Scripta Materialia, Dez. 2015, Vol. 109, S. 113-117.



Alexander Ramonat, Dipl.-Ing.
Optimierung umformtechnischer
Fügeverfahren zur Kontaktierung
elektrischer Leiter

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

IGF-Vorhaben: 18617BR / 2

Der Ausbau der Elektromobilität und insbesondere die zunehmende Elektrifizierung im Automobilbau macht es erforderlich, die eingesetzten Fügeverfahren hinsichtlich ihrer elektrischen Eigenschaften zu optimieren. Dabei sind die mechanischen Eigenschaften zu berücksichtigen und es ist eine Kompromissauslegung notwendig. Im Automobilbau werden häufig umformtechnische Fügeverfahren wie das Clinchen und das Halbhohlstanzen zum Herstellen von Längsverbindungen sowie Funktionselemente in Form von Einnietmuttern und Stanzbolzen zum Anbinden von Leitern eingesetzt. Im Rahmen des Projekts wurden die Fügeparameter dieser Verfahren bezüglich des elektrischen Kontaktverhaltens optimiert und das Langzeitverhalten bei Temperaturen von bis zu 120 °C untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass neben den Fügeparametern insbesondere die Wahl der Leiterwerkstoffe und deren Grenztemperatur für ein gutes Langzeitverhalten entscheidend sind (Bild 1).

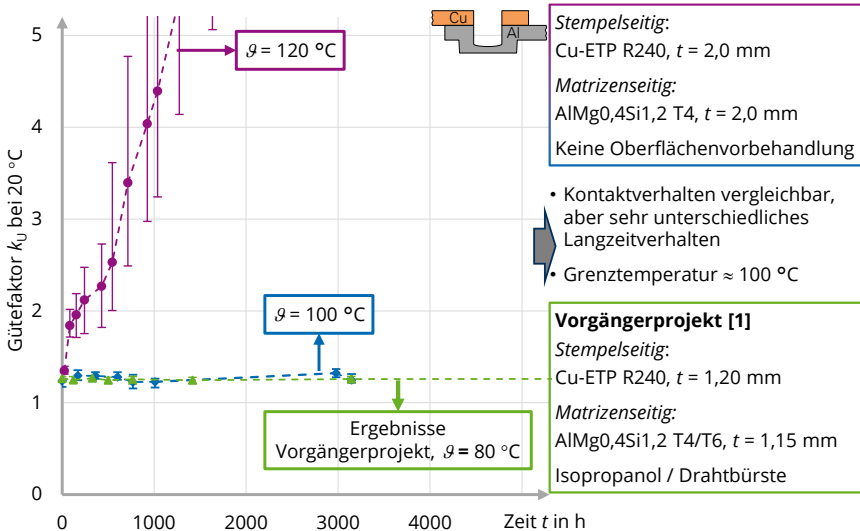


Bild 1: Gütfaktor k_U von geclinchten stromführenden Verbindungen mit einem Kontaktpartner aus Cu-ETP und einem aus AlMgSi abhängig von der Zeit t und Temperatur

Bei geclinchten Verbindungen kann aufgrund der großen Umformung während des Fügens auf eine abrasive Vorbehandlung der Kontaktflächen verzichtet werden. Das

Kontaktverhalten ist mit dem, der Verbindungen aus dem vorangegangenen Projekt, bei dem die Kontaktflächen abrasiv vorbehandelt wurden, vergleichbar. Das Langzeitverhalten der Verbindungen, bei denen mindestens ein Kontaktpartner aus Aluminium besteht, ist bei einer Temperatur von 120 °C nicht stabil. Bereits nach kurzer Zeit erhöhten sich die Gütefaktoren deutlich. Mit Härtemessungen im Ausgangszustand und nach einer Zeit von 1000 h sowie 5000 h wurde eine deutliche Entfestigung der Aluminiumlegierung im Bereich des Kontakts, d. h. im Bereich höchster Umformung, nachgewiesen. Die Härte am unbeeinflussten Leiter erhöhte sich im gleichen Zeitraum zunächst durch wachsende Ausscheidungen, da die Leiter im Zustand T4 gefügt wurden. Geclinchte Verbindungen mit Kontaktpartnern aus Cu-ETP und CuFe2P waren hingegen auch bei einer Temperatur von 120 °C im untersuchten Zeitraum von 5000 h stabil. Bei diesen Verbindungen änderte sich die Härte im Bereich der Verbindung nur geringfügig. Ähnliche Ergebnisse wurden auch bei den halbhohlstanzengetieteten Verbindungen bestimmt.

Im Rahmen des Projekts wurden die Fügeparameter für den Normalbetrieb, d. h. für das dauerhafte Führen von Strömen im Bereich des Nennstroms optimiert sowie die Grenztemperaturen für diesen Belastungsfall abhängig von den Fügetechnologien und Leiterwerkstoffen bestimmt. Während des Betriebs können jedoch auch Fehler auftreten, die zu kurzzeitig wirkenden hohen Strömen führen. Die Vorgänge in Grenzsichten und die Wechselwirkung der verschiedenen Fügepartner unter Einfluss nahezu adiabatischer Erwärmung und elektromagnetischer Kräfte durch die Kurzzeitströme sind noch nicht betrachtet (Bild 2).

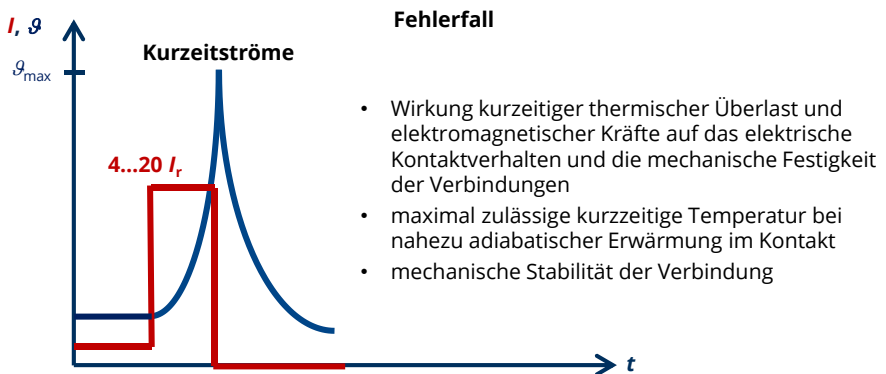


Bild 2: Schematischer Verlauf von Strom und Temperatur einer Verbindung im Fehlerfall

Im beantragten Folgeprojekt werden daher die mechanischen und elektrischen Eigenschaften der optimierten Verbindungen im Fehlerfall untersucht. Ein wesentliches Ziel des Projekts ist es, die zulässigen Grenztemperaturen der Verbindungen im Fehlerfall zu bestimmen und die Wirkung elektromagnetischer Kräfte auf die mechanische Stabilität zu untersuchen.

[1] U. Füssel, S. Großmann, J. Kalich, S. Schlegel, J. Schmid. *Elektrisches Eigenschaftsprofil umformtechnischer Fügeverbindungen*. EFB Forschungsvorhaben AiF/EFB 16952BF

**Stephan Schlegel, Dr.-Ing.**
**Auslegung stromführender Schrauben-
verbindungen für die Anwendung in der
Elektroenergie-technik und der
Elektromobilität**

Die Gestaltung von stromführenden Schraubenverbindungen in Anlagen der Elektroenergie-technik, aber zunehmend auch im Bereich der Elektromobilität, erfordert es, einheitliche Auslegungskriterien anzuwenden. Schraubenverbindungen werden mechanisch nach der VDI 2230-1:2003 berechnet und dimensioniert [1]. Damit werden Vorspannkkräfte bestimmt, die zu einem stabilen mechanischen Verhalten unter Berücksichtigung äußerer Kräfte führen (Bild 1). Parameter für ein gutes elektrisches Kontaktverhalten werden dabei nicht berücksichtigt. Um dies zukünftig in der Auslegung abbilden zu können, wurde eine Schnittstelle in der Berechnungsvorschrift ermittelt, die genutzt werden kann, um den Zusammenhang zwischen elektrischem und mechanischem Kontaktverhalten herzustellen.

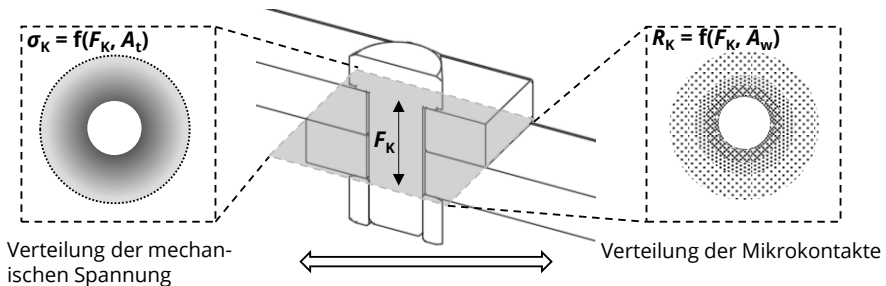


Bild 1: Zusammenhang zwischen Verteilung der mechanischen Spannung σ_K und dem Kontaktwiderstand R_K abhängig von der Kontaktkraft F_K und der mechanischen tragenden Kontaktfläche A_t sowie der wahren Kontaktfläche A_w am Bsp. einer Schraubenverbindung (schematisch)

Entscheidend für einen niedrigen Anfangswert des Verbindungswiderstands R_{V0} bzw. des Gütefaktors k_{u0} ist neben einer spezifischen Vorbehandlung der Kontaktflächen eine ausreichende Flächenpressung in der Kontaktebene zwischen den stromführenden Leitern. Um diese abschätzen zu können, kann die Ersatzquerschnittsfläche A_{Ers} des Druckkegels in der Kontaktebene berechnet werden (Bsp. Gl. (1)) [2].

$$A_{\text{Ers}} = \frac{\pi}{4}(d_w^2 - d_h^2) + \frac{\pi}{8}d_w l_k [(x+1)^2 - 1] \quad \text{mit } x = \sqrt[3]{\frac{d_w l_k}{(d_w + l_k)^2}} \quad (1)$$

d_h ...Lochdurchmesser

l_k ...Klemmlänge

d_w ...Außendurchmesser der ebenen Schrauben-
kopf-Auflagefläche

Abhängig vom Leiter- oder Beschichtungswerkstoff kann experimentell der Zusammenhang zwischen Kontaktkraft und Verbindungswiderstand bestimmt und mit der Ersatzquerschnittsfläche ein Bezug zur mittleren mechanischen Spannung σ_m in der Kontaktebene hergestellt werden (Bild 2). Es kann eine maximale zulässige mittlere mechanische Spannung bestimmt werden, bei der elastische Verformung auftritt und verglichen werden, ob diese ausreichend ist, um ein gutes Kontaktverhalten zu erreichen. Für Schraubenverbindungen mit Leitern aus technisch reinem Aluminium ist diese Bedingung unzureichend. Für Schraubenverbindungen mit Stromschiene aus Kupfer oder legierten Aluminium konnte ein gutes Kontaktverhalten bei rein elastischer Verformung der Fügelemente erreicht werden.

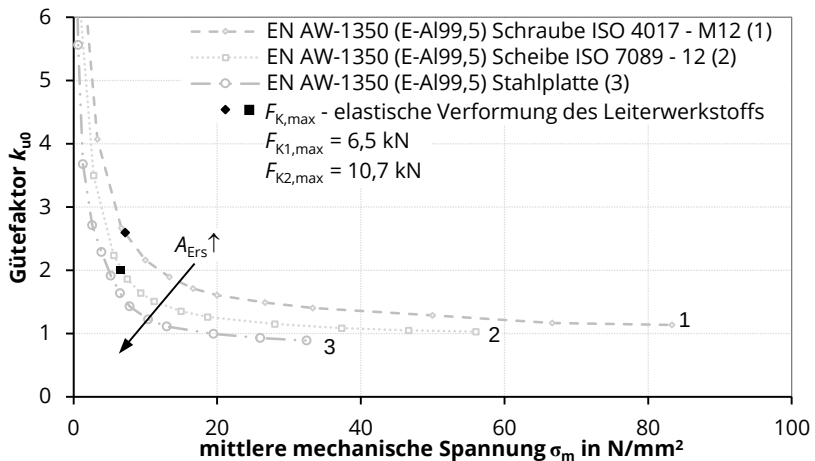


Bild 2: Gütefaktor k_{u0} abhängig von der mittleren mechanischen Spannung σ_m (Bsp. E-Al99,5)

Weiterführende Untersuchungen haben gezeigt, dass in bestimmten Grenzen Ähnlichkeitskriterien zwischen Schraubenverbindungen mit unterschiedlicher Geometrie der Stromschiene sowie Größe der Fügelemente vorhanden sind, so dass ein verallgemeinerbarer Zusammenhang beschrieben werden kann. Damit ist es möglich das elektrische Kontaktverhalten bei der mechanischen Auslegung zu berücksichtigen. Der Ansatz rein elastischer Verformung kann dabei abhängig von den eingesetzten Werkstoffen unzureichend sein, sodass plastische Verformung zugelassen werden muss. Ist rein elastische Verformung ausreichend, um ein gutes Kontaktverhalten zu erreichen, wird damit der Kraftabbau im Betrieb reduziert, da keine zusätzliche Kaltverfestigung eingebracht wird, so dass durch diesen Ansatz auch das Langzeitverhalten verbessert wird.

- [1] K.-H. Kloos, W. Thomala. *Schraubenverbindungen - Grundlagen, Berechnung, Eigenschaften, Handhabung*. 5. Aufl., Berlin, Heidelberg. 2007. - ISBN: 978-3-540-21282-9
- [2] T. Fuhrmann, S. Schlegel, S. Großmann, M. Hoidis. *Studies on current-carrying connections with flat surfaces - relationship between mechanical stress and electrical contact behavior*. 28th International Conference on Electric Contacts, Edinburgh. 2016.

Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Hochspannungstechnik“



Karsten Backhaus, Dr.-Ing.
**Aktuelle Herausforderung an moderne
 rotierende elektrische Maschinen**

Die Hersteller rotierender Maschinen sehen sich aktuell vielen technischen Herausforderungen gegenüber, welche die elektrische Isolierung der Maschinen betreffen.

Werkstoffe und Lebensdauer

Zunächst seien hierzu das drohende Verbot von Anhydrid-Härter durch die europäische REACH¹-Verordnung, und die wegfallende Verfügbarkeit von Zink-Naphtanat-Beschleunigern für die Tränkhärzreaktion und bestimmter Polyimide benannt.

Da sich die Isolierung elektrischer Maschinen in der Regel aus einem System von Einzelkomponenten zusammensetzt und deren elektrische Eigenschaften von der Interaktion der Materialien abhängt, bedarf es der Klärung möglicher Eigenschaftsänderungen des gesamten Isoliersystems für den Fall, dass eine Komponente substituiert werden muss. Dies erfolgt durch aufwendige Versuche, welche durch die Anforderungen der IEC-60034-Normenfamilie vorgegeben werden. So bedarf es insbesondere für teilentladungsbehaftete Isoliersysteme eines Lebensdauernachweises nach der IEC 60034-18-Reihe, die mit hohem Prüfaufwand in großer Regelmäßigkeit am IEEH durchgeführt werden.

Teilentladungen

Die Feststoffisolierung von Motoren kann aufgrund der Tränktechnologie aufgrund von Hohlräumen oder entsprechenden Zwickeln teilentladungsbehaftet sein. Die sichere Messung der Teilentladungsimpulsströme insbesondere bei Impulsspannungen verschiedener Formen mit unterschiedlichen Messverfahren sind Gegenstand der aktuellen Forschung [1].

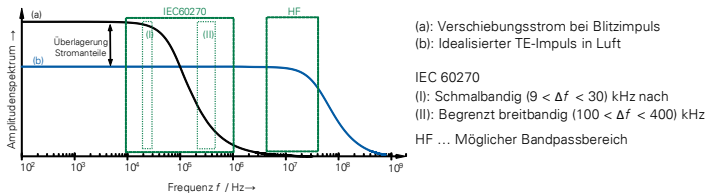


Bild 1: Qualitatives Frequenzspektrum für unterschiedliche Signalformen, Vorgaben der IEC 60270 und der resultierende Messbereich [2]

¹ EG-Verordnung Nr. 1907/2006: **Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals**

Hierzu bedarf es neben der sensitiven Strommessung einer Spannungsquelle, welche sich durch eine hohe Spannungsqualität auszeichnet, sodass beispielsweise ein optimaler Bandpass gemäß Bild 1 gesetzt werden kann. Dieser unterdrückt den Einfluss der Prüfspannung und ermöglicht eine Aufzeichnung jener Stromimpulse die auf Teilentladungen beruhen.

Mit dieser Methode können fertigungsbedingte Fehler wie Hohlstellen detektiert und elektrisch charakterisiert werden.

Impulsförmige Spannungsbelastung bei Betrieb an Frequenzumrichtern

Der Betrieb elektrischer Maschinen an Frequenzumrichtern stellt Isoliertechniker vor anspruchsvolle Aufgaben. Wird das induktiv-kapazitive elektrische Netzwerk einer Maschine durch Impulse hoher Steilheit belastet, treten sowohl Wanderwellen- als auch Eigenschwingungseffekte überlagernd auf - Bild 2. Dies kann in Abhängigkeit der Pulsfolge oder Pulsbreite zu einer hohen Belastung der eingangsseitigen oder inneren Wicklungen einer Maschine führen, welche dem vielfachen der eigentlichen Nominalspannung entsprechen können.

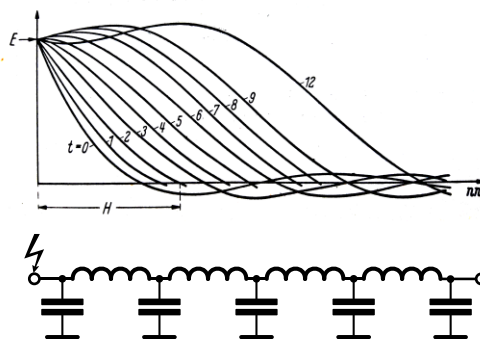


Bild 2: Qualitatives, zeitliches Verhalten der Potentialverteilung innerhalb einer Phase einer elektrischen Maschine bei Belastung mit Impulsspannung [3], [4]

In aktuellen Untersuchungen soll der Einfluss der Eigenfrequenz einer Maschine auf diese Phänomene geklärt werden. Dies ist insofern von hohem Interesse, da davon ausgegangen wird, das zukünftig SiliziumCarbid-basierte Umrichter bei sehr hohen Schaltfrequenzen gefahren werden.

- [1] L. Elspaß. *Messen von Teilentladungen bei repetierender Impulsspannung*. Studienarbeit, Technische Universität Dresden, 2018
- [2] M. Bauer. *Messen impulsförmiger Ströme in mineralischem Isolieröl bei auftretenden Vorentladungen*. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, 2018
- [3] J. Kiefer. *Zum Einfluss der Eigenfrequenzen von Hochspannungsmotoren auf die innere Spannungsverteilung bei Impulsspannungsbelastung*. Kooperative Masterarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden und Technische Universität Dresden, 2018.
- [4] R. Rüdenberg. *Elektrische Wanderwellen auf Leitungen und in Wicklungen von Starkstromanlagen*. Springer Verlag, 1962



Tobias Gabler, Dipl.-Ing.
Durchschlagversuche an Öl-Papier-
isolierten Anordnungen bei Gleich-,
Impuls- und zusammengesetzter
Spannungsbelastung

Leistungstransformatoren in Konverterstationen der Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) werden im Betrieb ventileitig mit einer zusammengesetzten Spannung aus Gleich- und Wechselspannung belastet. Diese kann zudem im Betrieb und im Fehlerfall mit schnellen, transienten Überspannungen überlagert werden. Zur Verbesserung der dielektrischen Dimensionierung dieser Betriebsmittel muss daher auch das Verhalten des Öl-Papier-Isoliersystems bei überlagerten Spannungsbelastungen bekannt sein.

Der in vorangegangenen Publikationen vorgestellte, ladungsträgerbasierte Ansatz kann die bei Gleichspannungsbelastung auftretenden Phänomene erklären sowie das dielektrische Verhalten qualitativ nachbilden [1, 2]. Dieser Ansatz beschreibt die Generation, die Drift sowie die Rekombination der verschiedenen Ladungsträgerspezies im Öl und im ölgetränkten Papier sowie deren Einfluss auf die elektrische Feldstärkeverteilung im System. Mithilfe des nichtlinearen Gleichungssystems nach *Poisson-Nernst-Planck* (PNP) können diese Mechanismen und Einflüsse rechnerisch nachgebildet werden, was anhand von Experimenten verifiziert werden konnte [1, 2].

Vor diesem Hintergrund wurden an einer planparallelen Plattenanordnung mit papierisolierten Elektroden Durchschlagexperimente durchgeführt, um das Verhalten des Isoliersystems bei einer zusammengesetzten Spannung (CV – engl.: *composite voltage*) aus einer Gleichspannung im stationären Zustand und bi- oder unipolar überlagerter Blitzimpulsspannung zu untersuchen (Bild 1). Deren Ergebnisse werden im Weiteren mit den rechnerisch ermittelten Feldstärkeverteilungen verglichen.

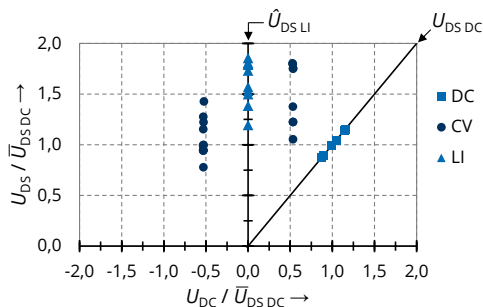


Bild 1: Ergebnisse der Durchschlagversuche der homogenen Anordnung mit papierisolierten Elektroden bei Gleich- / Impuls- und zusammengesetzter Spannungsbelastung [3]

Die Ergebnisse der Durchschlagversuche zeigen, dass bei der unipolaren Überlagerung im Mittel ähnliche Festigkeiten ermittelt werden, wie bei reiner Impulsspannungsbelastung.

Bei der bipolaren Überlagerung wurden deutlich geringere Durchschlagspannungen gemessen, welche zudem im Bereich der Festigkeiten bei reiner Gleichspannungsbelastung liegen. Jedoch wurden bei reiner Gleichspannungsbelastung die geringsten Durchschlagspannungen ermittelt. Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass der Polaritätswechsel die größere Beanspruchung für das Isoliersystem darstellt.

Die Berechnungsergebnisse des ladungsträgerbasierten Modells zeigen, dass die Papierbarrieren aufgrund der geringeren Ladungsträgermobilität im Papier während der Gleichspannungsvorbelastung mit Ladungsträgern angereichert werden. Da diese Ladungsträger dieselbe Polarität besitzen wie die angrenzende Elektrode, werden die Papierbarrieren entlastet und der mittlere Ölpalt entsprechend stärker beansprucht (Bild 2). Verglichen mit dem Polaritätswechsel bei der bipolaren Überlagerung werden die Papierbarrieren stärker beansprucht, die höchste Beanspruchung stellt sich jedoch immernoch im Ölpalt ein. Die Berechnungen zeigen zudem, dass sich im Vergleich zur reinen Gleichspannungsbelastung bei der bipolaren Überlagerung geringere Maximalfeldstärken einstellen (Bild 3). Herkömmliche Berechnungsmodelle zeigten beim Polaritätswechsel nahezu eine Verdopplung der Feldstärke im Ölpalt und somit eine bedeutend stärkere Beanspruchung im Vergleich zur Gleichspannungsvorbelastung. [3]

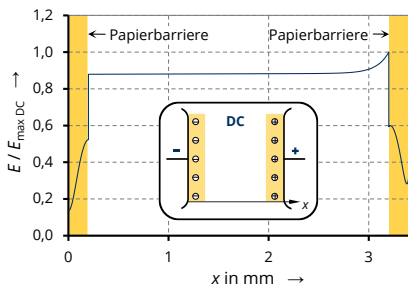


Bild 2: Berechnete Feldstärkeverteilung für reine Gleichspannungsbelastung [3]

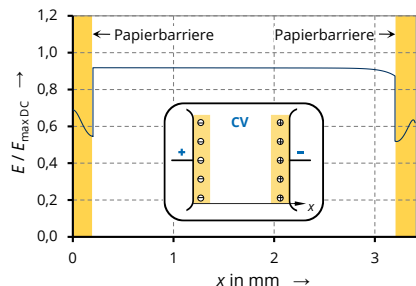


Bild 3: Berechnete Feldstärkeverteilung für bipolare Überlagerung [3]

Die Ergebnisse der Durchschlagversuche stimmen somit auch bei der überlagerten Spannungsbelastung aus Gleich- und Blitzimpulsspannung qualitativ überein. Jedoch treten bei den Berechnungsergebnissen noch Unsicherheiten auf. Zum einen sind die Parameter der Ladungsträger noch weitestgehend unbekannt, was sich entsprechend auf die ermittelte Feldstärkeverteilung auswirkt. Des Weiteren bleibt die statistische Streuzeit des Durchschlagprozesses bei der Auswertung unberücksichtigt.

- [1] K. Backhaus. *Das dielektrische Verhalten der Öl-Papier-Isolierung bei Belastung mit hoher Gleichspannung*. Dissertation, TU Dresden, 2016
- [2] T. Gabler, K. Backhaus, J. Speck, S. Großmann, R. Fritsche. *Experimental Validation of the Charge Carrier-based Modelling of Oil-Paper-Insulations at high DC Voltage Stress*. 20th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Buenos Aires, 2017
- [3] T. Gabler, K. Backhaus, T. Götz, R. Fritsche, T. Linde, S. Großmann. *Untersuchung des Durchschlagverhaltens von Öl-Papier-isolierten Anordnungen bei Überlagerung von Gleich- und Blitzimpulsspannung*. VDE-Fachtagung Hochspannungstechnik, Berlin, 2018.



Thomas Götz, Dipl.-Ing.
Grundlegende Untersuchungen zum
Teilentladungsverhalten in
Gas-Feststoff-Isoliersystemen
unter Gleichspannungsbelastung

Gefördert durch:
DFG Deutsche
 Forschungsgemeinschaft

Eine Herausforderung der Energiewende in Deutschland besteht darin, dass hohe Leistung über weite Distanzen transportiert werden muss. Dies ist ökonomisch nur mit Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) möglich. Auch ist bei der Anbindung von Offshore-Windparks an das bestehende Netz die Verwendung von Gleichspannung häufig die einzige technische Lösung. Hinzu kommt das auf Offshore-Plattformen, in dicht besiedelten Gebieten und in Übergabestationen von Freileitungen auf Kabel, Kabel auf Kabel oder von Kabeln auf gasisierte Leitungen (GIL) die kleinräumigen gasisierten Anlagen vorteilhaft eingesetzt werden können.

Die Beibehaltung der bekannten Versorgungszuverlässigkeit macht es notwendig, dass der sichere Betrieb dieser gasisierten Anlagen bei Gleichspannungsbelastung zu jeder Zeit gewährleistet ist. Dabei hat sich die Teilentladungsmessung als ein wichtiges Kriterium zur Fehlerdiagnose bei Wechselspannungsanwendungen bewährt. Insbesondere aufgrund des fehlenden Phasenbezuges und dem Einfluss von Raum- und Oberflächenladungen stellt die Teilentladungsdiagnose in allen Betriebsmitteln der HGÜ eine besondere Herausforderung dar.

Dieses Projekt liefert einen Beitrag zum besseren Verständnis der Entladungsmechanismen in Gas-Feststoff-Isoliersystemen bei Gleichspannungsbelastung. Dabei wird sowohl das bekannte Isoliergas Schwefelhexafluorid (SF_6) als auch synthetische Luft als klimafreundlichen Alternative untersucht.

Das schwach-inhomogene elektrische Feld der gasisierten Anlagen wird mit einer Kugel-Platte-Anordnung nachgebildet. Als Störstelle dient eine Stahlspitze mit definiertem Spitzenradius (Bild1).

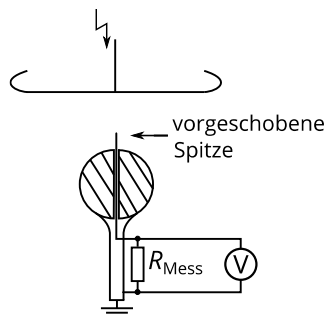


Bild 1: Kugel-Platte-Anordnung mit gegen Erdpotential isolierter Spitze als Störstelle und Messelektrode

Die Untersuchungen erfolgen abhängig vom Isoliergasdruck und der elektrischen Feldstärke. Als Gleichspannungsquelle dient eine symmetrische Verdopplerschaltung, welche im Vergleich zur bekannten Greinacherschaltung eine Gleichspannung mit geringerem Rippel zur Verfügung stellt (Bild 2).

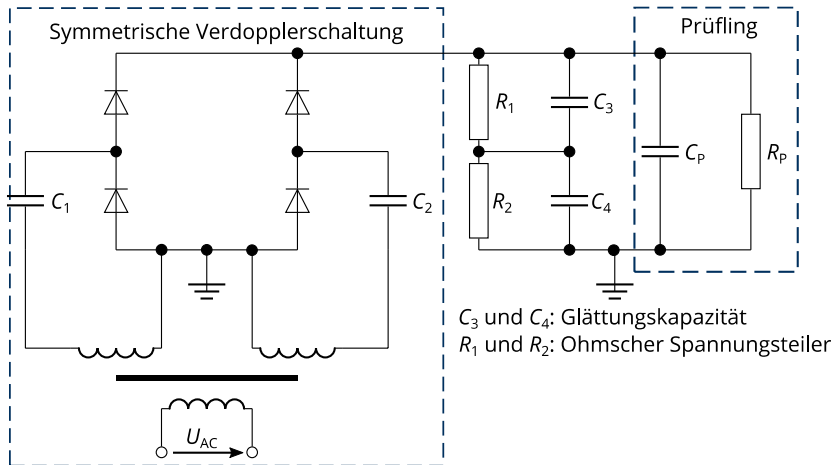


Bild 2: Symmetrische Verdopplerschaltung

Die optischen und elektrischen Größen der Teilentladungen werden mit einem digitalen Speicheroszilloskop aufgezeichnet. Dabei ist insbesondere hervorzuheben, dass der Teilentladungsstrom direkt über einen Hochfrequenzshunt gemessen wird, um eindeutige Aussagen zu den physikalischen Prozessen liefern zu können. Vergleichend dazu werden die bekannten Methoden zur Teilentladungsdiagnose mittels UHF und nach IEC 60270 untersucht. Auch ist eine im UV-Bereich sensitive Photodiode im Gasraum installiert. Dies ermöglicht eine Auswertung der optischen Signale, welche infolge von Teilentladungen entstehen.

Das Forschungsvorhaben liefert einen Beitrag zum langfristig sicheren Betrieb der Energieversorgungsinfrastruktur und zur Aufrechterhaltung der hohen Versorgungszuverlässigkeit.

Das Projekt, gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, Projektnummer 379542208) begann im November 2017. Die Projektlaufzeit beträgt 36 Monate.



Thomas Linde, Dipl.-Ing.
Einfluss von Oberschwingungen auf die
Zuverlässigkeit und Lebensdauer von
Isoliersystemen
SaxoGRID



Europäische Union

Im Verbundprojekt SaxoGRID wird an der Technischen Universität Dresden und an der Hochschule Zittau/Görlitz erforscht wie Verteilnetze auch in der Zukunft mit signifikantem Anteil an erneuerbaren Energien sicher betrieben werden können. Die sächsischen Netzbetreiber und Firmen sind dabei in enger Kooperation tätig und unterstützen die fünf im Projekt beschäftigten Wissenschaftler (Bild 1). Ein Teil der Forschungsagenda besteht in der Untersuchung des Einflusses von Oberschwingungen auf die Zuverlässigkeit und Lebensdauer von Isoliersystemen.

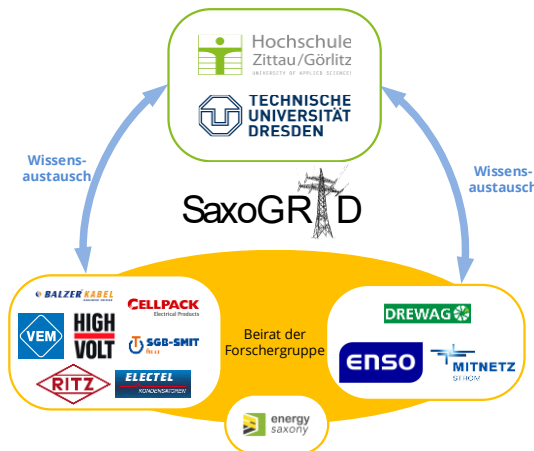


Bild 1: SaxoGRID Projektgruppe

Der Frequenzumrichter als Betriebsmittel in Netzen wird in Zukunft an Bedeutung gewinnen, denn er erlaubt rotierenden, elektrischen Maschinen drehzahlvariabel zu agieren. Für gewöhnlich speisen Windkraftanlagen drehzahlvariabel ein, da deren Netzanknüpfung über einen Umrichter sicherstellt, dass die Netzfrequenz gewahrt wird. Moderne Umrichter nutzen Leistungshalbleiterschalter mit hohen Schaltfrequenzen und schnellen Anstiegszeiten. Trotz mehrstufigem Aufbau und Tiefpassfiltern sind Umrichter durch ihre Schaltimpulse signifikante Verursacher von Oberschwingungen in der Netzspannung.

Eine Schwachstelle von Systemen mit festen Isolierstoffen ist die Wärmeentwicklung infolge von Leitungs- und Polarisationsverlusten, die beschleunigte Alterung und im schlimmsten Fall das Isolationsversagen zur Folge haben. Durch das Wirken verschiedener

Polarisationsmechanismen sind die Verluste frequenzabhängig. Somit lässt sich auch ein Einfluss höherfrequenter Anteile wie z. B. Oberschwingungen vermuten.

Der dielektrische Verlustfaktor $\tan \delta$ erlaubt den Vergleich der Verluste verschiedener Isoliermaterialien bei gleichen Bedingungen (Frequenz, Temperatur). Die Berechnung und Messung sind sowohl in IEC 62631-2-1 [1] als auch in VDE 0303-4 [2] genormt. Die üblichen Messmethoden sind jedoch nicht für Spannungen mit höherfrequenten Anteilen geeignet. VDE 0303-4 schlägt vor, dass für schwierige Messungen auch der Ansatz gewählt werden kann, den Quotient aus in Wärme umgesetzter Energie (Wirkleistungsumsatz) zur reversibel gespeicherten Energie (Blindleistungsumsatz) zu nutzen (Formel 1). Dieser leistungsorientierte Ansatz soll genutzt und getestet werden um eine Möglichkeit zu schaffen die Verluste bei Oberschwingungsbelasteter Spannung zu quantifizieren.

$$\tan \delta = \frac{P_{\delta}}{Q_c} = \frac{P_{\delta,1} + \sum_{i=3}^n P_{\delta,i}}{\sqrt{S^2 - P_{\delta}^2}} \quad (1)$$

Unter Nutzung dieser Erkenntnisse werden dann verschiedene Isoliermaterialien (Epoxidharze, Polyethylen, Öl-Papier) bezüglich ihrer dielektrischen Eigenschaften bei Oberschwingungsbelasteter Spannung untersucht. Hierfür wird ein Versuchsstand mit einer synthetischen Oberschwingungsquelle aufgebaut.

Weiterhin ist die Untersuchung des Langzeitverhaltens der Isolierstoffe Bestandteil des Projektes. Die Kombination aus hoher Feldstärke durch die dominante Spannung der Grundschwingung und darüber hinaus hochfrequenter Anteile durch Oberschwingungen kann zu einem Anstieg der Temperatur im Isolierstoff führen [3]. Unter Beobachtung der dielektrischen Eigenschaften wird der Einfluss der Oberschwingungsanteile auf die elektrische Festigkeit der Isoliermaterialien untersucht. An technischen Isolieranordnungen wie z. B. Formspulen kann der Einfluss der Oberschwingungen auf reale Isoliersysteme erforscht werden. Hierbei kommen Alterungsprozesse wie z. B. Teilentladungen ins Spiel, deren Mechanismen nachweislich durch Oberschwingungen beeinflusst werden [4].

Das Projekt liefert einen Beitrag zum besseren Verständnis der Isoliermaterialien in Bezug auf zukünftige Herausforderungen bei deren Einsatz in Elektroenergiesystemen.

Die Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf Grundlage des von den Abgeordneten des Sächsischen Landtags beschlossenen Haushalts.

- [1] IEC 62631-2-1: *Dielectric and resistive properties of solid insulating materials - Part 2-1: Relative permittivity and dissipation factor - Technical Frequencies (0,1 Hz - 10 MHz) - AC Methods*. 2018
- [2] DIN VDE 0303-4: *Bestimmungen für elektrische Prüfungen von Isolierstoffen; Bestimmung der dielektrischen Eigenschaften*. Dez. 1969
- [3] D. Fabiani, G. C. Montanari. *The effect of voltage distortion on ageing acceleration of insulation systems under partial discharge activity*. IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 17, no. 3, pp. 24–33, Mai 2001
- [4] M. Florkowski, B. Florkowska, P. Zydroń. *High voltage harmonics induced modifications of PD phase-resolved patterns*. Archives of Electrical Engineering, vol. 67(2), pp. 231–246, 2018



Matthias Voigt, Dipl.-Ing.
Elektro-Impuls-Zerkleinerung von komplexen Erzen (ELIZE) und Untersuchung des Zündverhaltens von Funkenstrecken

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Im Rahmen eines Förderprojekts des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) wird die wirtschaftliche Aufbereitung von komplexen Erzen mithilfe des Elektro-Impuls-Verfahrens in Zusammenarbeit mit dem Institut für Aufbereitungsmaschinen der TU Bergakademie Freiberg untersucht.

Rohstofflagerstätten von Komplexerzen mit wirtschaftsstrategischen Elementen, wie z. B. Indium, Wolfram und Germanium, sind derzeit mit konventioneller Technik in Deutschland nicht wirtschaftlich aufbereitbar. Die hohe Festigkeit und Zähigkeit sowie das feinkörnige Gefüge erschweren ihre Zerkleinerung [1].

Das Elektro-Impuls-Verfahren, welches bereits für Tiefenbohrungen von Hartgesteinen erforscht wird [2], verspricht einen positiven Effekt für die Aufbereitung von Komplexerzen. Dabei werden Entladungen zwischen zwei Elektroden erzeugt, die vorwiegend entlang von Korngrenzen durch das Gestein „wandern“ und so die einzelnen Körner separieren und damit das Gefüge schwächen (Bild 1).



Bild 1: Risschädigung in Greisen

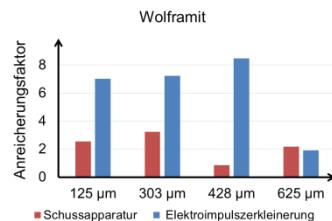


Bild 2: Vergleich des Anreicherungs-faktors von Wolframit

Dadurch kann bei der weiteren mechanischen Zerkleinerung mithilfe von Brechern der Energiebedarf um bis zu 24 % gesenkt werden. Zudem kann der Aufschlussgrad deutlich erhöht werden: Bei ersten Versuchen befand sich im entstandenen Feinmaterial (Korngröße 125 bis 625 µm) bereits ein deutlich höherer Anteil des gesuchten Materials als bei herkömmlichen mechanischen Methoden (Bild 2). Dadurch können bisher nicht wirtschaftlich nutzbare Ressourcen aufbereitet werden.

Neben den Untersuchungen zum Durchschlagmechanismus in Gestein wird das Zündverhalten des Impulsspannungsgenerators erforscht. Um die thermischen Energieverluste möglichst gering zu halten, wurden die Ladewiderstände durch Ladeinduktivitäten ersetzt. Aufgrund des geringen Bauraums 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. Um das Verhalten bei Fehlzündungen nachzuvollziehen wurden umfangreiche Untersuchungen zum Durchschlagverhalten der einzelnen Funkenstrecken durchgeführt. Ein Netzwerkmodell wurde entwickelt, um dieses Verhalten zu verifizieren.

Zusätzlich wurden Untersuchungen zum Einfluss der Photoionisation durchgeführt. Die erste Funkenstrecke wurde auf 2 mm Elektrodenabstand eingestellt, die zweite Funkenstrecke von 2,1 bis 3,5 mm variiert. Besteht Sichtkontakt zwischen beiden Funkenstrecken, so reicht die Überspannung, die durch das Durchzünden der ersten Funkenstrecke ausgelöst wird, aus, um die zweite Funkenstrecke zum Durchzünden zu animieren (Bild 3 links). Im zweiten Schritt wurde eine Sichtblende zwischen beiden Funkenstrecken angebracht. Dadurch sinkt die Wahrscheinlichkeit eines Durchschlags der zweiten Funkenstrecke (Bild 3 rechts).

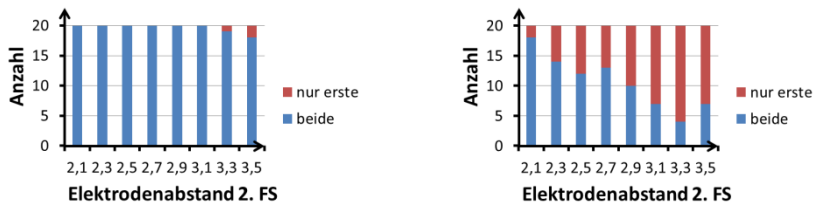


Bild 3: Durchschlagverhalten der zweiten Funkenstrecke ohne (links) und mit (rechts) Sichtblende

Aus den Potenzialmessungen an den Funkenstrecken wird ersichtlich, dass die Sichtblende einen Einfluss auf die Potenzialverhältnisse hat (Bild 4). Ohne Sichtblende kommt es zur raschen Potenzialanhebung an beiden Elektroden (Bild 4 links) und zum Durchzünden der Funkenstrecke. Mit Sichtblende erfolgt der Potenzialanstieg langsamer und der Durchschlagzeitpunkt verschiebt sich auf ein Vielfaches (Bild 4 rechts).

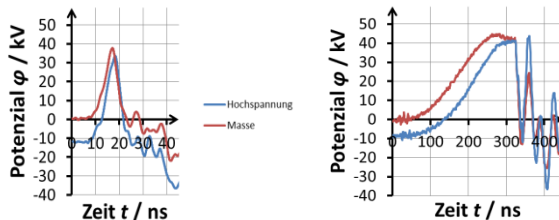


Bild 4: Potenzialverhältnisse an der zweiten Funkenstrecke ohne (links) und mit (rechts) Sichtblende

- [1] M. Mezzetti, O. Popov, H. Lieberwirth, E. Anders, M. Voigt, P. Hoske. *Microstructural investigation of complex ores processed with electric impulses*. XXIX International Mineral Processing Congress, Moskau, 17.-21.09.2018
- [2] M. Voigt, E. Anders, S. Großmann. *Mit Elektro-Impulsen zur Erdwärme*. 15. Symposium Energieinnovation, Graz, 14.-16.02.2018

Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Strombelastbarkeit und Erwärmung“



Julian Heger, Dipl.-Ing.
Thermisches Dimensionieren
explosionsgeschützter
Niederspannungs-
Schaltgerätekombinationen mit
der Wärmenetzmethode

Gefördert durch:



Explosionsgeschützte Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen sind thermisch so zu dimensionieren, dass die in den Normen festgelegten Grenztemperaturen nicht überschritten werden. Dieser Nachweis wird bisher unter einem hohem finanziellen und personellen Aufwand experimentell erbracht [1]. Um den Aufwand zu verringern, soll der Nachweis auch rechnerisch erbracht werden können. Um die Erwärmung zu berechnen, sind Kenntnisse zu den Wärmequellen und zu den Vorgängen der Wärmeübertragung in den explosionsgeschützten Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen notwendig. An einer ausgewählten explosionsgeschützten Niederspannungs-Schaltgerätekombination wurden die Wärmequellen und die Vorgänge der Wärmeübertragung in den verschiedenen explosionsgeschützten Betriebsmitteln, zwischen den Betriebsmitteln und in der Schaltgerätekombination untersucht. Für die Betriebsmittel und Baugruppen wurden hierarchisch strukturierte Wärmenetze aufgebaut und experimentell verifiziert. Die Wärmenetze modellieren die dominanten Wärmequellen und die Vorgänge der Wärmeübertragung mit konzentrierten Wärmenetzelementen [2]. Durch die hierarchische Struktur können einmal aufgebaute komplexe Wärmenetze in einzelne konzentrierte Wärmenetzelemente überführt werden. Diese hierarchischen Wärmenetzelemente lassen sich beliebig oft wiederverwenden und über Schnittstellen einfach mit weiteren Wärmenetzen zusammenschalten (Bild 1).

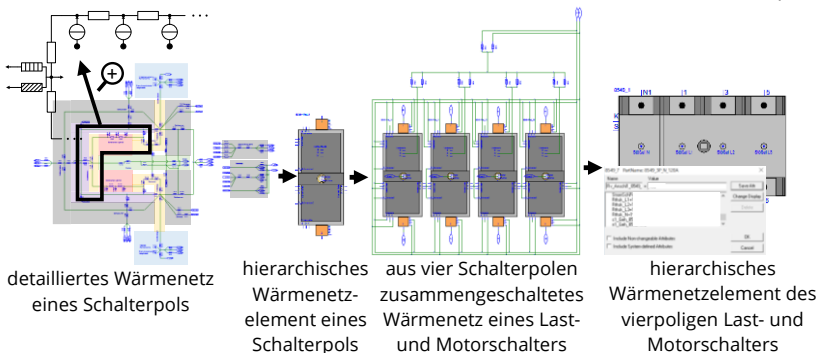


Bild 1: Hierarchisch aufgebautes Wärmenetz eines vierpoligen explosionsgeschützten Last- und Motorschalters

Um das vollständige Wärmenetz der explosionsgeschützten Niederspannungs-Schaltgerätekombination aufzubauen, wurden die Wärmenetze der verschiedenen explosionsgeschützten Betriebsmittel zusammengeschaltet. Die Vorgänge der Wärmeübertragung zwischen den Betriebsmitteln, z. B. über die umlaufende Luft in der explosionsgeschützten Schaltgerätekombination, wurden dabei mit berücksichtigt.

Im Vergleich zu anderen Methoden berechnet die Wärmenetzmethode die Erwärmung der gesamten explosionsgeschützten Niederspannungs-Schaltgerätekombination sehr schnell. Es ist daher möglich, in kurzer Zeit rechnerisch den Einfluss verschiedener Parameter, z. B. des Verbindungswiderstandes eines explosionsgeschützten Betriebsmittels, auf die Erwärmung der explosionsgeschützten Niederspannungs-Schaltgerätekombination zu untersuchen (Bild 2).

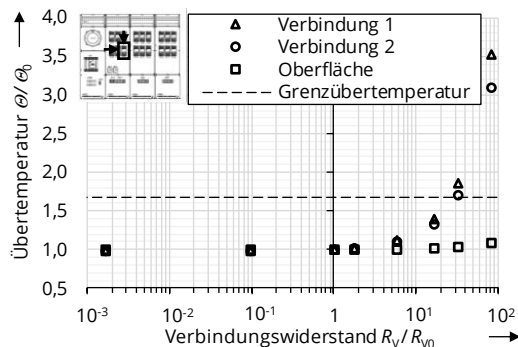


Bild 2: mit dem Wärmenetz berechnete Übertemperaturen eines explosionsgeschützten Betriebsmittels abhängig vom Verbindungswiderstand und bei Nennstrom

Anhand der berechneten Übertemperaturen lassen sich Aussagen zur thermischen Dimensionierung und für den Nachweis, dass die zulässigen Grenztemperaturen nicht überschritten werden, ableiten. Der vorhandene Verbindungswiderstand R_{V0} ist sehr gering und repräsentiert keine dominante Stromwärmequelle. Die zulässigen Grenzübertemperaturen der Verbindungen 1 und 2 werden nicht erreicht. Ein noch geringerer Verbindungswiderstand verringert die Übertemperaturen an den Verbindungen nicht. Bei einem Verbindungswiderstand von $R_V \approx 20 \cdot R_{V0}$ verschiebt sich die höchste Übertemperatur von der Verbindung 2 zur Verbindung 1 und die zulässige Grenzübertemperatur wird erreicht. Die Übertemperatur der Oberfläche der druckfesten Kapselung des explosionsgeschützten Betriebsmittels ändert sich für alle untersuchten Verbindungswiderstände nur sehr gering und ist daher mit den Verbindungen des explosionsgeschützten Betriebsmittels thermisch kaum verbunden.

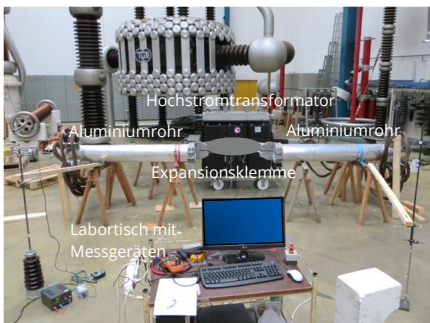
- [1] DIN EN 60079-0: *Explosionsgefährdete Bereiche - Teil 0: Betriebsmittel - Allgemeine Anforderungen*. 2014.
- [2] J. Heger, O. Walch, S. Großmann. *Thermal dimensioning of an explosion protected residual current operated circuit-breaker with overcurrent protection by the Thermal Network Method*. International Youth Conference on Energy 2017, Budapest 2017.



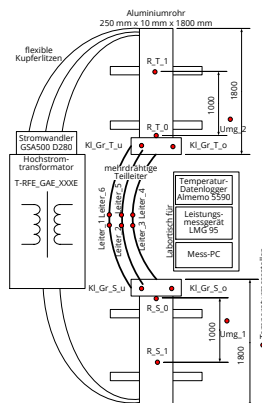
Robert Adam, Dipl.-Ing.
Verifikation der Modelle zum
Berechnen der Stromaufteilung in
Expansionsklemmen für
Sammelschienen

Um die thermischen Dehnungen in Sammelschienen auszugleichen, kommen Expansionsklemmen mit mehreren flexiblen Teilleitern zum Einsatz. Aufgrund des magnetischen Wechselfeldes teilt sich der Belastungsstrom der Sammelschiene abhängig von der Impedanz der Anordnung zwischen den flexiblen Teilleiter der Expansionsklemme auf. Die Anordnung der flexiblen Teilleiter ist so zu dimensionieren, dass eine möglichst gleichmäßige Aufteilung des Belastungsstromes der Sammelschienen auf die Teilleiter erreicht wird. Damit kann sichergestellt werden, dass sich die einzelnen Teilleiter möglichst gleichmäßig erwärmen. Mit Hilfe eines FEM-Programmes wurde die Anordnung der flexiblen Teilleiter einer Expansionsklemme $I_r = 8000\text{ A}$ so berechnet, dass sich eine möglichst gleichmäßige Stromaufteilung ergibt. Durch experimentelle Untersuchungen waren die gleichmäßige Stromaufteilung und damit die gleichmäßige Erwärmung der einzelnen flexiblen Teilleiter nachzuweisen.

Die experimentellen Untersuchungen zur Erwärmung der Expansionsklemme wurden unter Laborbedingungen (kein Wind, keine Wärmeleistung durch Sonnenstrahlung) in einer Versuchshalle durchgeführt. Die Expansionsklemme wurde dazu auf zwei Rohre aus Aluminium mit einem Außendurchmesser von 250 mm und einer Wandstärke von 10 mm und einer Länge von 1800 mm montiert (Bild 1).



(a) Bild



(b) Skizze

Bild 1: Versuchsaufbau zur experimentellen Untersuchung der Erwärmung und der Stromaufteilung einer Expansionsklemme ($I_r = 8000\text{ A}$) für Sammelschienen

Der Hochstromtransformator T-RFE_GAE_XXE wurde mit flexiblen Kupferlitzen an die Aluminiumrohre angeschlossen. Die Expansionsklemme, die Aluminiumrohre, die Kupferlitzen und die sekundarseitigen Anschlüsse des Hochstromtransformators bildeten damit eine Leiterschleife. Der Bogen der flexiblen Teilleiter der Expansionsklemme wurde ins Innere dieser Leiterschleife positioniert (Bild 1). Die Temperaturen ϑ an den Klemmen-Grundkörpern und den flexiblen Teilleitern wurden mit insgesamt 16 NiCr-Ni-Thermoelementen (Klasse 1) gemessen und durch einen Temperaturdatenlogger (AHLBORN, Typ Almemo 5590) erfasst. Zwei weitere Thermoelemente, durch Kunststoffbehälter vor Konvektion und Strahlung geschützt, erfassten die Umgebungstemperaturen in Höhe der Mitte der Aluminiumrohre. Der vom Hochstromtransformator eingespeiste Belastungsstrom $I_B \approx 8000$ A wurde durch einen Stromwandler (ELEQ, Typ GSA500 D280, Klasse 0,5) transformiert und mittels eines Leistungsmessgerätes (ZIMMER, Typ LMG 95, Grundgenauigkeit 0,025 %) gemessen. Ein Mess-PC zeichnete die gemessenen Temperaturen und den gemessenen Belastungsstrom auf. Um die einzelnen Ströme in den flexiblen Teilleitern der Expansionsklemme zu messen, kam eine Rogowskispule (LEM, RT2000, Genauigkeit 0,65 %) und ein Digitalmultimeter (AGILENT, U1231A, Grundgenauigkeit 0,5 %) zum Einsatz. Die Temperaturen der Expansionsklemme und der Umgebung wurden während der Belastung mit $I_B \approx 8000$ A kontinuierlich aufgezeichnet. Um die Erwärmung der Expansionsklemme unabhängig von der Umgebungstemperatur ϑ_0 bewerten zu können, werden die Übertemperaturen ϑ , also die Differenz $\Delta\vartheta$ zwischen den gemessenen Temperaturen ϑ der verschiedenen Messstellen und Umgebungstemperatur ϑ_0 , genutzt.

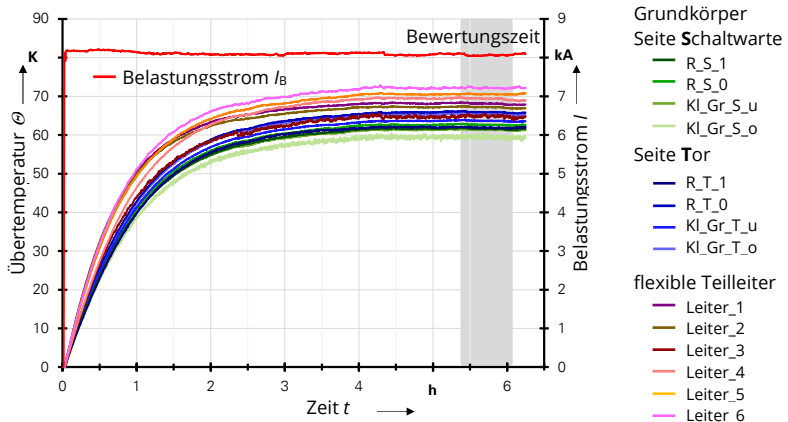


Bild 2: Verlauf der Übertemperaturen an der Expansionsklemme bei Belastung mit $I_B \approx 8000$ A ($\vartheta_{\min} = 18,7$ °C $\vartheta_{\max} = 20,9$ °C)

Die im Erwärmungsversuch gemessenen Teilleiterströme und Temperaturen zeigen deutlich eine sehr gleichmäßige Stromaufteilung zwischen den Teilleitern der Expansionsklemme und bestätigen damit die mit Hilfe eines FEM-Programmes berechneten Ergebnisse.



Markus Schladitz, Dipl.-Ing.

Aufbau eines Wärmenetzmodells zum Berechnen der Erwärmung einer Weiche im Bahnverkehr

Während der Wintermonate können sich Schnee und Eis zwischen der Backen- und Zungenschiene einer Weiche anlagern und so ein ordnungsgemäßes Stellen der Weiche verhindern. Verspätungen und Ausfälle von Zugverbindungen sind meist die Folge. Der Einsatz von elektrischen Weichenheizungen ist eine Maßnahme, um das zu verhindern. Obwohl die Verwendung von Weichenheizsystemen eine etablierte Methode darstellt, funktionieren diese nicht für alle Umgebungsbedingungen effektiv. Der Wärmetransport selbst ist in einer Weiche noch nicht komplett verstanden. Der Aufbau eines Wärmenetzes zum Berechnen der Erwärmung einer Weiche soll es ermöglichen, Randbedingungen für einen effektiven Einsatz eines elektrischen Weichenheizsystems zu bestimmen.

Dafür werden zunächst separate Wärmenetze für die Teilkomponenten einer Weiche aufgebaut und anschließend miteinander verknüpft. Backenschiene und Zungenschiene stellen die Hauptkomponenten einer Weiche dar und somit werden deren Modelle zuerst aufgestellt (Bild 1).



Bild 1: Weiche mit Backenschiene und Zungenschiene

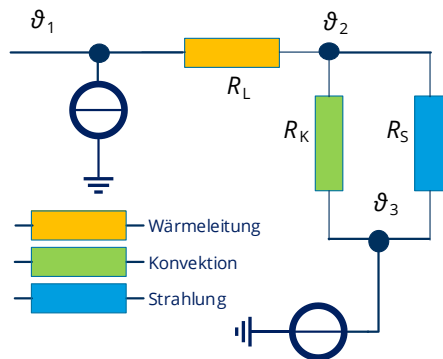
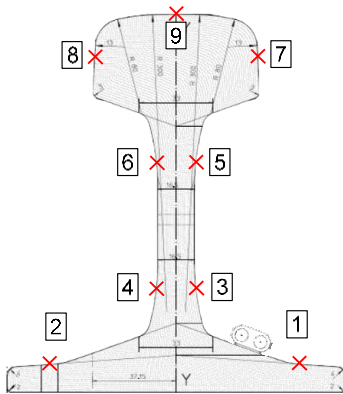


Bild 2: Beispielhaftes Wärmenetz zur stationären Temperaturberechnung

Ein Wärmenetzmodell nutzt die Analogie zwischen dem elektrischen und dem thermischen Strömungsfeld. Eine Temperaturdifferenz wird durch eingeprägte Leistungen (realisiert durch Leistungsquellen) und durch definierte Temperaturwerte (Temperaturquellen) generiert. Die Wärmeübertragungsprozesse transportieren thermische Energie in Richtung der Temperaturdifferenz. Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung sind die

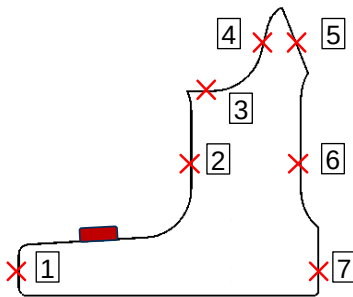
Prozesse der Wärmeübertragung und werden im Wärmenetzmodell in Form von thermischen Widerständen dargestellt (Bild 2). Als Ergebnis erhält man die Temperatur an jedem Knoten des Netzwerkes.

Die originalen Geometrien von Backen- und Zungenschiene werden zunächst approximiert. Anschließend werden die Netzwerke mit den thermischen Elementen aufgebaut. Mithilfe eines Versuchsaufbaus ist es möglich, die verschiedenen Parameter der Wärmeübertragungsprozesse zu bestimmen.



Referenzpunkt	$\theta_{\text{rech}} / ^\circ\text{C}$	$\theta_{\text{mess}} / ^\circ\text{C}$	$\Delta\theta / \text{K}$
1	69,8	75,6	-5,8
2	63,3	63,5	-0,2
3	61,9	58,3	3,6
4	61,4	58,3	3,1
5	52,0	50,1	1,9
6	50,5	50,1	0,4
7	48,3	45,2	3,1
8	47,7	45,2	2,5
9	47,7	45,4	2,3

Bild 1: Messwerte und berechnete Werte der Backenschiene bei $\vartheta_u = 17,1 ^\circ\text{C}$; $P' = 300 \text{ W/m}$



Referenzpunkt	$\theta_{\text{rech}} / ^\circ\text{C}$	$\theta_{\text{mess}} / ^\circ\text{C}$	$\Delta\theta / \text{K}$
1	77,3	75,5	1,8
2	72,9	70,9	2,0
3	72,3	70,5	1,8
4	71,4	69,4	2,0
5	71,4	69,8	1,6
6	72,8	71,1	1,7
7	74,1	71,5	2,6

Bild 2: Messwerte und berechnete Werte der Zungenschiene bei $\vartheta_u = 33,9 ^\circ\text{C}$; $P' = 167 \text{ W/m}$

Die Abweichungen zwischen den berechneten und den gemessenen Temperaturen sind sowohl für die Backenschiene als auch für die Zungenschiene sehr gering. Somit sind die Wärmenetze beider Komponenten experimentell verifiziert.

3.2.2 Publikationen

Vorträge

Gabler, T.:

Überlagerte Spannungsbelastung von Öl-Papier-Isolierungen.

26. Kolloquium Hochspannungs- und Anlagentechnik,
München, 30.06.2018

Gabler, T.:

Effect of voltage pre-stress and service conditions on the dielectric stress of oil paper-insulations.

47th Cigré Session 2018,
Paris, Frankreich, 26.-31.08.2018

Heger, J.:

*Thermisches Dimensionieren explosionsgeschützter Energieverteilersysteme mit der Wärmenetz-
methode.*

Expertenforum R. STAHL 2018,
Weimar, 12.-13.04.2018

Hildmann, C.:

Recent results from long-term tests with current carrying fittings of HTLS-conductors.

IEC TC 11 Joint Working Group 13 Meeting,
Brüssel, Belgien, 07.03.2018

Israel, T.:

Zum Verhalten von Steckverbindern der Elektroenergietechnik im Fehlerfall.

26. Kolloquium Hochspannungs- und Anlagentechnik,
München, 30.06.2018

Oberst, M.:

Einfluss von Sauerstoff auf die Alterung von stromführenden Bimetall-Verbindungen.

26. Kolloquium Hochspannungs- und Anlagentechnik,
München, 30.06.2018

Schladitz, M.:

Thermische Modelle zur Berechnung von Weichen für Vollbahnen.

26. Kolloquium Hochspannungs- und Anlagentechnik,
München, 30.06.2018

Veröffentlichungen

Füssel, U.; Johne, V.; Kalich, J.; Schlegel, S.; Oberst, M.; Großmann, S.:
Elektrische Kontaktierung mit geschraubten Verbindungen.
12. Informations- und Diskussionsveranstaltung Schraubenverbindungen 2018,
Darmstadt, 17.05.2018

Gabler, T.; Backhaus, K.; Götz, T.; Fritsche, R.; Linde, T.; Großmann, S.:
Untersuchung des Durchschlagverhaltens von Öl-Papier-isolierten Anordnungen bei Überlagerung von Gleich- und Blitzimpulsspannung.
VDE Fachtagung Hochspannungstechnik 2018,
Berlin, 12.-14.11.2018

Gabler, T.; Backhaus, K.; Götz, T.; Großmann, S.; Fritsche, R.:
Effect of the non-linear electric conductivity of mineral insulating oil on the dielectric strength at high DC voltage stress.
IEEE 2018 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP),
Cancún, Mexiko, 21.-24.10.2018

Gabler, T.; Backhaus, K.; Speck, J.; Großmann, S.; Fritsche, R.:
Experimental Investigations of Oil-Insulated Arrangements at High DC Voltage and Composite Voltage Stress considering a Charge Carrier-based Approach.
47th Cigré Session 2018,
Paris, Frankreich, 26.-31.08.2018

Götz, T.; Linde, T.; Simka, P.; Speck, J.; Backhaus, K.; Gabler, T.; Riechert, U.; Großmann, S.:
Oberflächenentladungen auf beschichteten Elektroden in gasisolierten Systemen bei Gleichspannungsbelastung.
VDE Fachtagung Hochspannungstechnik 2018,
Berlin, 12.-14.11.2018

Götz, T.; Moghadam, D. E.; Speck, J.; Backhaus, K.; Gabler, T.; Simka, P.; Riechert, U.; Großmann, S.:
Surface discharge behaviour of coated electrodes in gas-insulated systems under DC voltage stress.
IEEE 2018 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP),
Cancún, Mexiko, 21.-24.10.2018

Heger, J.; Kurzweil, F.; Schladitz, M.; Adam, R.; Großmann, S.:
Experimental verification of an optimised heating system for hollow sleepers containing points positioning systems.
5th International Conference on Road and Rail Infrastructure (CERTRA 2018),
Zadar, Kroatien, 17.-19.05.2018

Hildmann, C.; Israel, T.; Schlegel, S.; Großmann, S.:
Recent findings in the long-term and short circuit behavior of power connections and their relevance for testing.

29th International Conference on Electrical Contacts,
Albuquerque, NM, U.S.A., 14.-18.10.2018

Israel, T.; Schlegel, S.; Großmann, S.; Kufner, T.; Freudiger, G.:
The Influence of Peak Current and ECR on the Transmission Performance of High Power Connectors during Faults.

29th International Conference on Electrical Contacts,
Albuquerque, NM, U.S.A., 14.-18.10.2018

Kiewitt, W.; Bardl, R.; Kühnel, C.; Loudon, D.; Stengel, D.:
Comparative Study of the Long-term Reliability of HTLS Conductor Systems.

47th Cigré Session 2018,
Paris, Frankreich, 26.-31.08.2018

Mezzetti, M.; Popov, O.; Lieberwirth, H.; Anders, E.; Voigt, M.; Hoske, P.:
Microstructural investigation of complex ores processed with electric impulses.

XXIX International Mineral Processing Congress,
Moskau, Russland, 17.-21.09.2018

Moghadam, D. Esmail; Speck, J.; Grossmann, S.; Stahl, J.:
The Parameters affecting the Turn Insulation Lifetime and Durability.

IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation (TDEI),
April 2018

Moghadam, D. Esmail; Speck, J.; Grossmann, S.; Stahl, J.:
Voltage Distribution in the Stator Windings of High Voltage Motors Fed by PWM Drives, Part I: Effects of the Pulse Characteristics.

2nd IEEE International Conference on Dielectrics,
Budapest, Ungarn, 01.-05.07.2018

Moghadam, D. Esmail; Speck, J.; Grossmann, S.; Stahl, J.:
Voltage Distribution in the Stator Windings of High Voltage Motors Fed by PWM Drives, Part II: Considering the Coil Arrangements.

2nd IEEE International Conference on Dielectrics,
Budapest, Ungarn, 01.-05.07.2018

Moghadam, D. Esmail; Speck, J.; Grossmann, S.; Stahl, J.:
Introducing of a Test Sample for IEC/TS 60034-18-42 to Assess the Durability of the Turn Insulation.

2nd IEEE International Conference on Dielectrics,
Budapest, Ungarn, 01.-05.07.2018

Oberst, M.; Schlegel, S.; Großmann, S.:

Influence of oxygen on the aging of electrical joints with one bare and one coated aluminum contact member.

29th International Conference on Electrical Contacts,
Albuquerque, NM, U.S.A., 14.-18.10.2018

Schladitz, M.; Adam, R.; Großmann, S.:

Set up of a thermal network method model for the calculation of temperature distribution in heated points.

5th International Conference on Road and Rail Infrastructure CERTRA 2018,
Zadar, Kroatien, 17.-19.05.2018

Voigt, M.; Anders, E.; Großmann, S.:

Mit Elektro-Impulsen zur Erdwärme.

15. Symposium Energieinnovation (EnInnov 2018),
Graz, Österreich, 14.-16.02.2018

Willing, H.; Pfeifer, S.; Oberst, M.; Freudenberger, R.; Schlegel, S.; Großmann, S.:

Einfluss von Oxiden innerhalb galvanischer Beschichtungen auf elektrische Verbindungen.

Zeitschrift Galvanotechnik, S.1339-1350,
Juli 2018

3.3 National Arc fault Research Center

Am National Arc fault Research Center (NARC) der TU Dresden werden Untersuchungen zu stromstarken Stör- und Schaltlichtbögen auf der Niederspannungsebene durchgeführt. In zahlreichen Projekten mit Partnern aus der Industrie und der Wissenschaft stehen meist die Einflüsse und Auswirkungen von Störlichtbögen, sowie der Einsatz, die Optimierung und der Test von Schutzsystemen zur Störlichtbogenerkennung im Fokus.

Gefahr durch Störlichtbögen

Treten Störlichtbögen in leistungsstarken Anlagen auf, sind nicht selten Menschenleben in Gefahr. Zudem können komplette Anlagen zerstört werden und in dessen Folge die elektrische Energieversorgung ausfallen. Normale Schmelzsicherungen, die in dem Bereich eingesetzt werden, bieten i. d. R. keinen ausreichenden Schutz.



Bild 1: 3-poliger Lichtbogenversuch an einem Niederspannungskabel NYY-J 4x120 mm² am NARC mit 10 kA Lichtbogenstrom

Ursachen für Störlichtbögen

Auslöser für Störlichtbögen sind häufig Tiere in der Anlage, aber auch falsch dimensionierte Betriebsmittel. Eine Vielzahl von Lichtbögen werden durch Unachtsamkeit bei der Durchführung von Wartungs- und Bedienarbeiten ausgelöst.

Experimentalvorführungen

Neben der wissenschaftlichen Forschung bietet das NARC Seminare zum Thema Störlichtbogenschutz an. Die experimentellen Vorführungen verdeutlichen den Teilnehmerinnen und Teilnehmern eindrucksvoll die Gefahr von stromstarken Störlichtbögen im Niederspannungsbereich. Zusätzlich werden die Teilnehmenden für die Notwendigkeit geeigneter Schutzmaßnahmen sensibilisiert.

Ausstattung

Am NARC lassen sich 1-, 2- und 3-polige Lichtbögen mit folgenden elektrischen Parametern untersuchen:

- Lichtbogenstrom $I_{LB} = 2 - 10 \text{ kA}$
- Prüfspannung $U_{Prüf} = 230/400 \text{ V AC}$

Der Lichtbogenstrom ist über Luftspulen variabel einstellbar. Durch die Luftspulen kann zusätzlich der Einfluss vom X/R -Verhältnis auf das Zünd- und Brennverhalten von Lichtbögen untersucht werden. Über einen gesteuerten Draufscharter lässt sich der Einfluss des Zündwinkels auf die Lichtbogenzündung durch reproduzierbare Einschaltzeiten detailliert erforschen.

Für Untersuchungen und Experimentalvorführungen steht am NARC folgende Ausstattung zur Verfügung:

- Messtechnik
- High-Speed-Kamera
- Test-Dummys
- Störlichtbogenschutzsysteme
- Demonstrationsaufbauten



Bild 2: Test-Dummy ohne Arbeitsschutzkleidung nach Lichtbogeneinwirkung

Erweiterung am NARC

Mit der geplanten Leistungserhöhung im AC-Bereich soll ein zusätzlicher 690-V-Prüfkreis installiert werden. Im Rahmen der Leistungserhöhung wird ebenfalls der mechanische Leistungsschalter gegen einen Thyristorschalter getauscht. Zudem ist der Aufbau eines DC-Lichtbogenprüfstandes geplant, mit dem es möglich ist, sowohl gleichrichtergespeiste als auch batteriegespeiste Lichtbogenversuche bis zu einer Prüfspannung von $U_{DC} = 1000 \text{ V}$ und einen Lichtbogenstrom von $I_{LB} = 18 \text{ kA}$ durchzuführen.

3.4 Preise und Auszeichnungen

„Franz-Stolze-Preis“ 2018 der TU Dresden

Seit 2010 stiften Herr Dr. Manfred Freimark und Frau Gudrun Stolze jährlich den „Franz-Stolze-Preis“. Die Stifter möchten damit an den in der Öffentlichkeit weitestgehend unbekannten Erfinder der modernen Gasturbine erinnern – den Berliner Ingenieur Franz Stolze. Die Gesellschaft von Freunden und Förderern der TU Dresden e.V. würdigt mit dem Preis jährlich herausragende wissenschaftliche Abschlussarbeiten von Studierenden und jungen Wissenschaftlern des Maschinenwesens und der Elektrotechnik der TU Dresden auf dem Gebiet der Energietechnik.

Am 16. Juni 2018 fand die diesjährige Verleihung des „Franz-Stolze-Preises“ im Rahmen des Tages der Fakultät Maschinenwesen der TU Dresden statt. Übergeben wurde der Preis vom Prodekan der Fakultät Maschinenwesen und Direktor des Institutes für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik, Prof. Dr.-Ing. Michael Beckmann (r.). Für seine Diplomarbeit zum Thema *„Messen impulsförmiger Ströme in mineralischem Isolieröl bei auftretenden Vorentladungen“* wurde Herr Dipl.-Ing. Michael Bauer (l.) unter anderem ausgezeichnet. Wir gratulieren Herrn Bauer recht herzlich zu dieser Auszeichnung!



Übergabe des „Franz-Stolze-Preises“ 2018

Foto: Christian Hüller

„HIGHVOLT-Preis“ 2018

Im Rahmen des Tages der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik 2018 am 28.09.2018 wurde bereits zum 11. Mal der HIGHVOLT-Preis verliehen. Die „HIGHVOLT Prüfung Dresden GmbH“ würdigt damit jährlich herausragende Diplomarbeiten auf dem Gebiet der Elektroenergietechnik.

Für seine Diplomarbeit zum Thema *„Messen impulsförmiger Ströme in mineralischem Isolieröl bei auftretenden Vorentladungen“* wurde in diesem Jahr Herr Dipl.-Ing. Michael Bauer (Mitte) ausgezeichnet. Übergeben wurde der Preis vom Bereichsleiter Technik bei HIGHVOLT – Herrn Thomas Steiner (l.) – zusammen mit dem Dekan der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik – Prof. Dr. phil. nat. habil. Ronald Tetzlaff (r.). Wir gratulieren Herrn Bauer recht herzlich!



Übergabe des „HIGHVOLT-Preises“ 2018

Foto: Lukas Lorenz

3.5 Habilitationen



Jan Meyer, Dr.-Ing.

**Bedeutung der Strom- und
Spannungsqualität in modernen
Elektroenergieversorgungsnetzen**

Eine angemessene Qualität der Elektroenergie ist eine wichtige Voraussetzung für den störungsfreien Betrieb aller an das Energieversorgungsnetz angeschlossenen Geräte und Anlagen. Die Habilitationsschrift gibt einen umfassenden Überblick zum Forschungsgebiet Elektroenergiequalität (Power Quality) und dessen Bedeutung für heutige und zukünftige elektrische Energieversorgungsnetze. Sie leistet einen Beitrag zum besseren Verständnis wichtiger Zusammenhänge und Wirkungsmechanismen und identifiziert neue Herausforderungen im Hinblick auf die Analyse und Bewertung der Elektroenergiequalität. Solche Kenntnisse sind von wachsender Bedeutung für die sachgerechte Planung von Energieversorgungsnetzen sowie das Verständnis für Beeinflussungen und Interaktionen zwischen den Betriebsmitteln des Netzes und Kundenanlagen im operativen Netzbetrieb. Die Arbeit geht detailliert auf das Niederspannungsnetz ein, da hier die meisten Endkunden angeschlossen sind und die Elektroenergiequalität damit einen besonders hohen Stellenwert hat.

Nach einer einführenden Erläuterung der Wirkungsmechanismen zur Entstehung von Netzzurückwirkungen werden die Grundprinzipien für die Koordination der Elektromagnetischen Verträglichkeit beschrieben. Im Anschluss werden die wichtigsten Qualitätsmerkmale und Qualitätskenngrößen systematisiert und im Hinblick auf ihre zukünftige Bedeutung diskutiert. Dabei wird besonderer Wert auf bestehende und neue Methoden zur effizienten und sachgerechten Bewertung der Qualitätskenngrößen sowohl im Rahmen der Planung als auch im Netzbetrieb gelegt. Durch die stetige Zunahme leistungselektronischer Komponenten im Netz ist insbesondere die Analyse der Verzerrung im Frequenzbereich kleiner 150 kHz von hoher Bedeutung. Diese bildete einen Schwerpunkt der Forschungsaktivitäten und wird deshalb ausführlicher behandelt. Aufgrund der qualitativen Unterschiede werden die Frequenzbereiche von 50 Hz bis 2 kHz und von 2 kHz bis 150 kHz dabei in getrennten Abschnitten betrachtet.

Die Arbeit wurde als kumulative Habilitation ausgeführt und stellt die Ergebnisse von zwanzig Jahren kontinuierlicher Forschung und Publikation auf dem Gebiet der Elektroenergiequalität dar. Sie basiert auf zehn ausgewählten Veröffentlichungen, welche die in den einzelnen Abschnitten behandelten Aspekte der Elektroenergiequalität weiter vertiefen und illustrieren. Die Veröffentlichungen wurden so ausgewählt, dass sie die gesamte Breite und Systematik der Forschungsaktivitäten besonders gut repräsentieren.

Die Ergebnisse der Forschungsaktivitäten wurden in zahlreichen Veröffentlichungen auf Konferenzen und in Fachzeitschriften sowie durch regelmäßige Vorträge auf Workshops,

Seminaren und Podiumsdiskussionen präsentiert und aktiv diskutiert. Wichtige Erkenntnisse flossen in normungsvorbereitende Arbeiten verschiedener Arbeitsgruppen u. a. bei CIGRE C4 ein. Nicht zuletzt wurde und wird ein maßgeblicher Beitrag zur Entwicklung der Bewertungsverfahren für Oberschwingungen in den relevanten deutschen Anwenderregeln sowie den D-A-CH-CZ „Technischen Regeln zur Beurteilung von Netzurückwirkungen“ geleistet.

Im Ergebnis der kontinuierlichen Arbeit auf dem Forschungsgebiet entstand eine Lehrveranstaltung zu den Grundlagen der Versorgungsqualität, welche zum Sommersemester 2014 eingeführt wurde. Die Vorlesung umfasst zwei Semesterwochenstunden und ist durch einen hohen experimentellen Anteil zur praktischen Veranschaulichung der Zusammenhänge gekennzeichnet.

Im Laufe der Jahre wurde eine leistungsfähige Laborumgebung aufgebaut, die aus verschiedenen Anlagen zur flexiblen Nachbildung der Bedingungen in Niederspannungsnetzen bis zu einer Leistung von 45 kVA besteht und insbesondere bei der Modellbildung der Störaussendung, der Untersuchung von Interaktionen zwischen verschiedenen elektrischen Geräten sowie Untersuchungen zur Störfestigkeit eingesetzt wird. Es wurde ein umfangreiches System aus mobilen und fest installierbaren Power Quality Messgeräten aufgebaut, welches für komplexe Labor- und Feldmessungen eingesetzt wird. Weitere wichtige Ergebnisse der Forschungsarbeiten sind ein System zur Zertifizierung von Messgeräten nach IEC 61000-4-30 Klasse A sowie Messsysteme zur Bestimmung des frequenzabhängigen Übertragungsverhaltens von Strom- und Spannungswandlern und der frequenzabhängigen Netzimpedanz im Niederspannungsnetz.

Aktuelle Diskussionen in Normungsgremien, auf Konferenzen und Seminaren zeigen, dass das Thema Power Quality auch zukünftig bei der ganzheitlichen Betrachtung des elektrischen Versorgungsnetzes einen wichtigen Platz einnehmen wird. Dabei werden der Frequenzbereich 2 kHz bis 150 kHz, ein besseres Verständnis von Gleichanteilen sowie spezielle Aspekte im Zusammenhang mit autarken Netzinseln bzw. Microgrids eine wichtige Rolle spielen.

Ausgewählte Veröffentlichungen der kumulativen Habilitation:

- [1] J. Meyer, M. Bollen, H. Amaris, A. M. Blanco, A. Gil de Castro, J. Desmet, M. Klatt, Ł. Kocewiak, S. Rönnerberg, K. Yang: "Future Work on Harmonics – Some Expert Opinions Part II – Supraharmonics, Standards and Measurements", 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), June 2014, Bucharest, Romania.
- [2] J. Meyer, A. M. Blanco, M. Domagk and P. Schegner: "Assessment of Prevailing Harmonic Current Emission in Public Low-Voltage Networks", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 32, no. 2, pp. 962-970, April 2017.
- [3] A. M. Blanco, S. Yanchenko, J. Meyer, P. Schegner: "The impact of supply voltage distortion on the harmonic current emission of non-linear loads", in DYNA 08/2015; 82(192):150-159.
- [4] D. Chakravorty, J. Meyer, P. Schegner, S. Yanchenko and M. Schocke: "Impact of Modern Electronic Equipment on the Assessment of Network Harmonic Impedance", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 8, no. 1, pp. 382-390, Jan. 2017.

3.6 Promotionen



Maher Bakka, M. Eng.

Untersuchungen zum Einfluss der elektrischen Felder auf das Design von Kompakthöchstspannungsmasten aus ultra-hochfestem Beton (UHPC) und zur Identifizierung der elektrischen und thermischen Parameter des UHPCs

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann - TU Dresden

Prof. Dr.-Ing. Mohammad Zhirh - Tishreen Universität - Syrien

Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Hofmann - Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden

Freileitungsmaste aus herkömmlichen Beton werden bereits heute in großer Zahl in Mittelspannungsnetzen eingesetzt. Im Bereich der Hochspannungsfreileitungen 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 Hochspannungsfreileitungen in kompakter Bauweise notwendig. Dazu sollen die Kompaktmaste aus ultra-hochfestem Beton (UHPC) hergestellt werden. Dafür ist eine neue Sorte von UHPC mit hoher Festigkeitsklasse zu entwickeln. Die Aufgabe der wissenschaftlichen Arbeit war es, die mechanischen, elektrischen und thermischen Eigenschaften des neuen Betonmaterials zu qualifizieren, die bisher unbekannt waren. Bisher gab es auch kaum Kenntnisse über die elektrischen und thermischen Belastungen, die auf die Betonmaste einer Hochspannungs-Freileitung in kompakter Bauweise einwirken.

Der Einfluss der elektromagnetischen Belastungen auf die Lebensdauer und die Festigkeit des Verbundes aus Stahl und Beton wurde in dieser Arbeit untersucht. Aufgabe der Arbeit war es auch, die elektrischen und thermischen Eigenschaften, wie die elektrische Leitfähigkeit, die elektrische Festigkeit, die Permittivität, den Verlustfaktor und die Wärmeleitfähigkeit experimentell zu bestimmen. Anhand der experimentellen Untersuchungen wurde der Versagensmechanismus des UHPC-Betons bei Spannungsbelastung identifiziert. Die am Betonmast auftretenden elektrischen und thermischen Belastungen wurden mit Hilfe von verschiedenen FEM-Modellen berechnet und den gemessenen Festigkeiten gegenübergestellt.

Es wurde der Einfluss permanenter elektrischer Felder auf die mechanischen Eigenschaften des UHPC bestimmt. Hierfür wurde die Druckfestigkeit des Betons vor und nach Dauerversuchen bei verschiedenen Spannungsbelastung gemessen. Der Verbund zwischen Stahl und Beton wurde in Lastwechselversuchen thermisch hoch beansprucht und dessen mechanische Festigkeit vor und nach der thermischen Belastung bei Auszugsversuchen gemessen.

Um gesundheitliche Risiken für Menschen und Tiere möglichst gering zu halten, sowie zur Begrenzung der gegenseitigen Beeinflussung benachbarter elektronischer Systeme (EMV)

dürfen die elektromagnetischen Felder von Freileitungen die jeweiligen maximal zulässigen Grenzwerte nicht überschreiten. Es wurde die Berechnungen der elektrischen und magnetischen Feldverteilung für die im Verbundvorhaben entwickelten Mastdesigns durchgeführt (Bild 1).

Die Arbeit wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert.

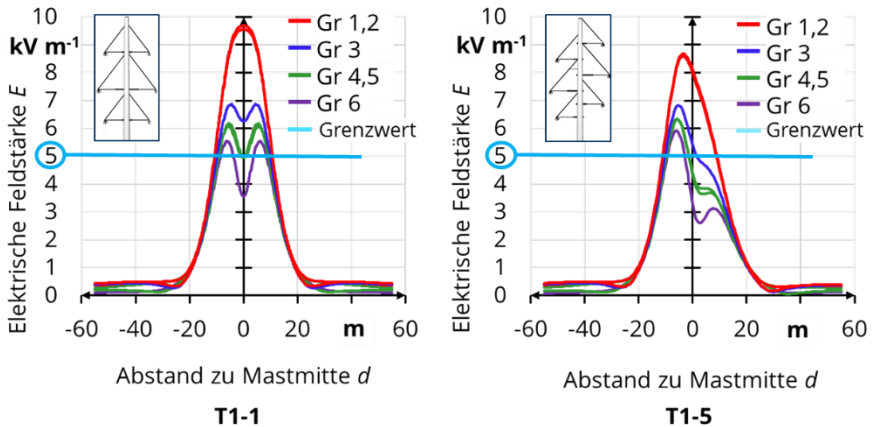


Bild 1: Elektrische Feldstärke in einer Höhe von 1 m über dem Boden, berechnet für die verschiedenen Entwürfe des Kompaktmastes



Robert Adam, Dipl.-Ing.
Beitrag zur thermischen Dimensionierung
von Niederspannungs-
Schaltgerätekombinationen

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann – TU Dresden
 Prof. Dr.-Ing. Rainer Haller

In der Niederspannungstechnik werden die Anlagen zum Übertragen und Verteilen von Elektroenergie als Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen bezeichnet. Damit ein langzeitstabiler Betrieb der Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen möglich ist, müssen die Anlagen mindestens normgerecht thermisch dimensioniert sein. Die Erwärmung von Geräten und Anlagen der Hoch- und Mittelspannungstechnik kann zuverlässig und wirtschaftlich bei unterschiedlichsten Randbedingungen mit der Wärmenetzmethode berechnet werden.

Um auch die Erwärmung von Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen mit ihren spezifischen Eigenschaften erfolgreich mit der Wärmenetzmethode berechnen zu können, wurden in dieser Arbeit die dominanten Wärmequellen (Hauptwärmequellen) innerhalb von Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen untersucht.

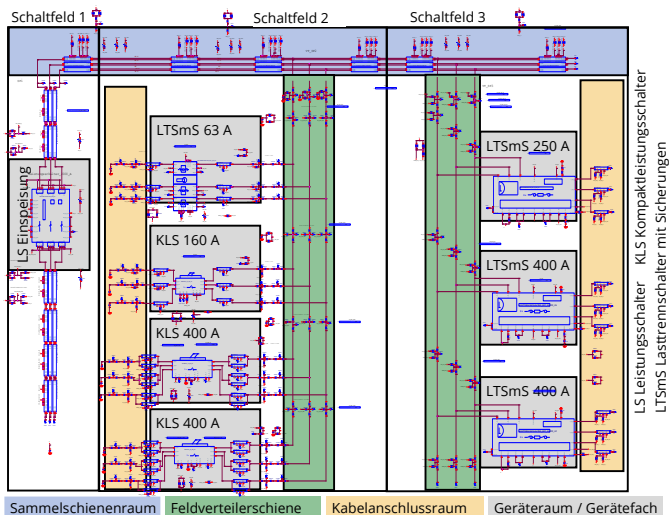


Bild 1: Wärmenetz einer Niederspannungs-Schaltgerätekombination

Die Ergebnisse wurden in die Wärmenetzmethode integriert und die Wärmenetze verschiedener Betriebsmittel von Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen aufgebaut und anhand von Experimenten verifiziert. Damit der Aufbau der Wärmenetze von Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen bei Variation verschiedener Betriebsmittel einfach und wirtschaftlich erfolgen kann, wurden die Wärmenetze der untersuchten Betriebsmittel modularisiert und in einer gemeinsamen Wärmenetzbibliothek zusammengefasst. Die Wärmenetze der einzelnen Betriebsmittel wurden zum Gesamt-Wärmenetz einer Niederspannungs-Schaltgerätekombination zusammengeschaltet (Bild 1). Die mit diesem Wärmenetz berechneten Temperaturen wurden dann durch Experimente an der Versuchsanlage einer Niederspannungs-Schaltgerätekombination verifiziert.

Eine der Hauptwärmequellen in Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen sind die ohmschen Leistungsverluste in den Strombahnen der Hauptsammel- und Feldverteilerschienen. Bei Drehstrombelastung werden die hier in den einzelnen Teilleitern erzeugten Verlustleistungen durch die Stromverdrängung aufgrund des Skin- und den überlagerten Proximity-Effekts maßgeblich beeinflusst. Gegenüber einer Gleichstrombelastung unterscheiden sich die Verlustleistungen jedes einzelnen Teilleiters um den Leistungsfaktor k_{3-} . Für Drehstromschienensysteme mit mehreren Teilleitern existierten bisher nur unzureichende Angaben zum Leistungsfaktor k_{3-} durch den Skin- und den Proximity-Effekt. In dieser Arbeit wurden FEM-Modelle aufgebaut, die Leistungsfaktoren k_{3-} für unterschiedliche Schienenanordnungen berechnet und anhand experimenteller Untersuchungen verifiziert (Bild 2).

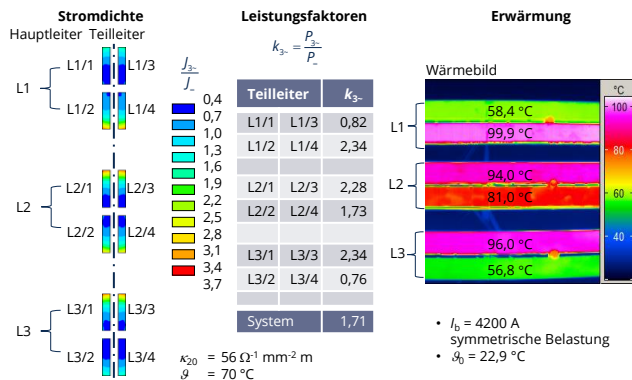


Bild 2: Stromdichteverteilung, Leistungsfaktoren und Erwärmung in einer 4 x 6 mm x 10 mm Sammelschiene bei Belastung mit symmetrischem Drehstrom (Darstellung ohne Neutralleiter)

Sind die Ergebnisse der untersuchten Wärmequellen in die Wärmenetze der verschiedenen Betriebsmittel von Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen integriert, ermöglichen die aufgebauten Wärmenetze die Berechnung von Temperaturen mit geringen Abweichungen (+4,4 K, -3,5 K) verglichen mit gemessenen Temperaturen. Mit den verifizierten und modularisierten Wärmenetzen der Betriebsmittel ist eine Möglichkeit geschaffen, Wärmenetze von Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen effizient und wirtschaftlich aufzubauen.



Alexander Ramonat, Dipl.-Ing.
**Untersuchungen zum elektrischen Kontakt-
 und Langzeitverhalten von
 Füge Technologien mit zylindrischen Leitern
 aus Aluminium**

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann - TU Dresden
 Prof. Dr.-Ing. Alexander Brosius - TU Dresden
 Dr.-Ing. habil. Konstantin Papailiou

Insbesondere in gasisolierten Schaltanlagen und Leitungen werden zylindrische Leiter aus Aluminium mit großen Durchmessern für den Elektroenergie transport eingesetzt. Um die Leiter mit anderen Bauteilen verbinden zu können, werden i. d. R. lösbare Steckverbindungen mit federnden Kontaktelementen eingesetzt (Bild 1). Zunächst wurde geprüft, welche Steckverbindungen durch nicht lösbare stromführende Verbindungen ersetzt werden können. Ziel war es dabei, die Kosten, die Verlustleistung zu verringern und die Zuverlässigkeit der gasisolierten Anlagen zu erhöhen. Grundlagenuntersuchungen wurden für diese Art von Verbindungen bisher noch nicht durchgeführt. Es wurde deshalb das Kontakt- und Langzeitverhalten betrachtet, um sicherzustellen, dass Dauerströme im Kiloampere-Bereich über mehrere Jahrzehnte sicher geführt werden können. Um nicht lösbare stromführende Verbindungen mit zylindrischen Leitern aus Aluminium herzustellen, können verschiedene Füge Technologien eingesetzt werden. Es wurden das Längs- und Querpressen sowie das elektromagnetische Umformen betrachtet (Bild 1).

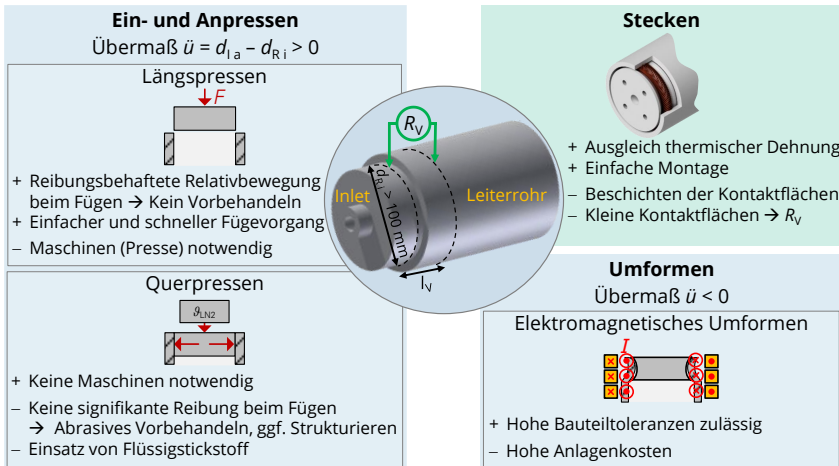


Bild 1: Übersicht der betrachteten Füge Technologien; d_{Ia} - Außendurchmesser Innenteil, d_{R1} - Innendurchmesser Leiterrohr, R_V - Verbindungswiderstand, l_V - Verbindungslänge

Zunächst wurde das elektrische Kontaktverhalten der Verbindungen abhängig von verschiedenen Fügeparametern experimentell bestimmt. Aus den Ergebnissen wurden Empfehlungen zur Vorbehandlung und zum Fügevorgang beim Längs- und Querpressen sowie zur Form der Innenteile beim elektromagnetischen Umformen erarbeitet. Mit mechanischen Berechnungsmodellen auf Basis der Finite-Elemente-Methode wurde der Fügevorgang beim Längs- und Querpressen nachgebildet und der für Flächenkontakte typische Zusammenhang zwischen der Kontaktkraft und Kontaktwiderstand betrachtet. Mit großem Übermaß, d. h. hoher Kontaktkraft, wurde ein niedriger Verbindungswiderstand erreicht (Bild 2). Zudem wurden durch mikroskopische Untersuchungen kontaktphysikalische Zusammenhänge gezeigt. In Versuchen bei thermischer und elektrisch-thermischer Belastung über eine Zeit von mehr als 20.000 h wurde das Langzeitverhalten der Verbindungen ermittelt (Bild 2). Es wurde gezeigt, dass die Fügetechnologien grundsätzlich zum langzeitstabilen Verbinden von zylindrischen Leitern aus Aluminium geeignet sind.

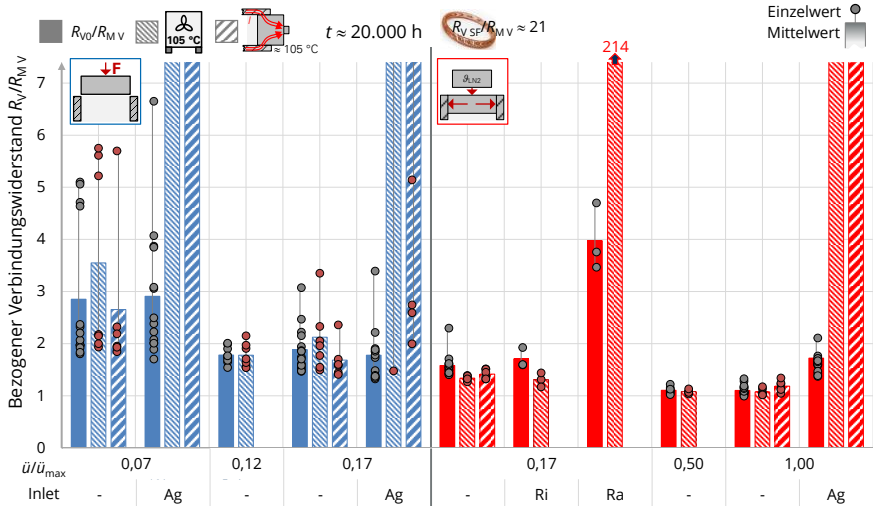


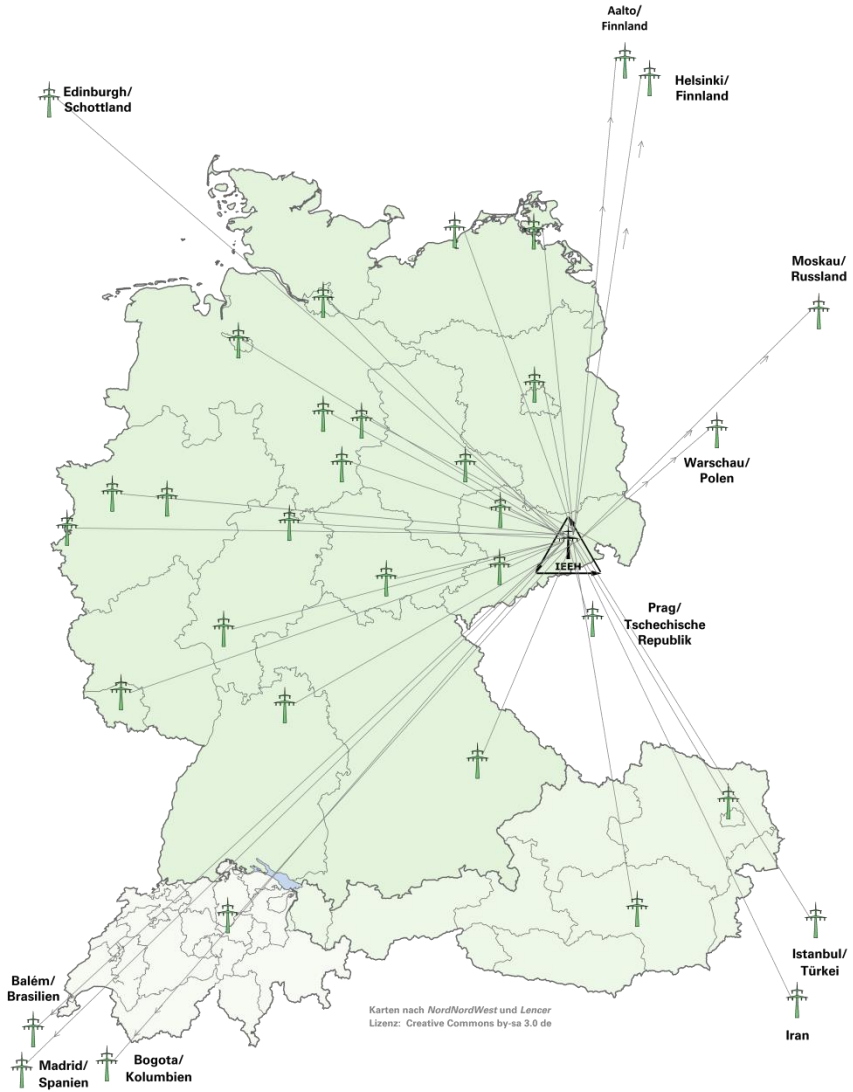
Bild 2: Ergebnisse zum Kontakt- und Langzeitverhalten von längs- und quergepressten Verbindungen abhängig vom bezogenen Übermaß $\bar{u}/\bar{u}_{\max}$ und den Eigenschaften der Kontaktfläche der Inlets, Ag - versilbert, Ri - gerillt, Ra - gerändelt

Die sehr große scheinbare Kontaktfläche und die vergleichsweise geringe mittlere mechanische Spannung sind für die untersuchten zylindrischen Verbindungen charakteristisch. Mit dem Kontaktwiderstandsbelag wurde ein elektrisches Vergleichs- und Bewertungskriterium für kraftschlüssige Flächenkontakte eingeführt. Es konnte gezeigt werden, dass das Kontaktverhalten quergepresster Verbindungen mit dem von Stromschienen, mit deutlich kleinerer Kontaktfläche, bei homogener Verteilung der mechanischen Spannung vergleichbar ist, sodass ein Vergrößerungsgesetz anwendbar ist. Es gilt zu überprüfen, ob dies auf Schraubenverbindungen mit inhomogener Verteilung der mechanischen Spannung erweitert werden kann.

4 Kooperationen

4.1 Wissenschaftskooperationen

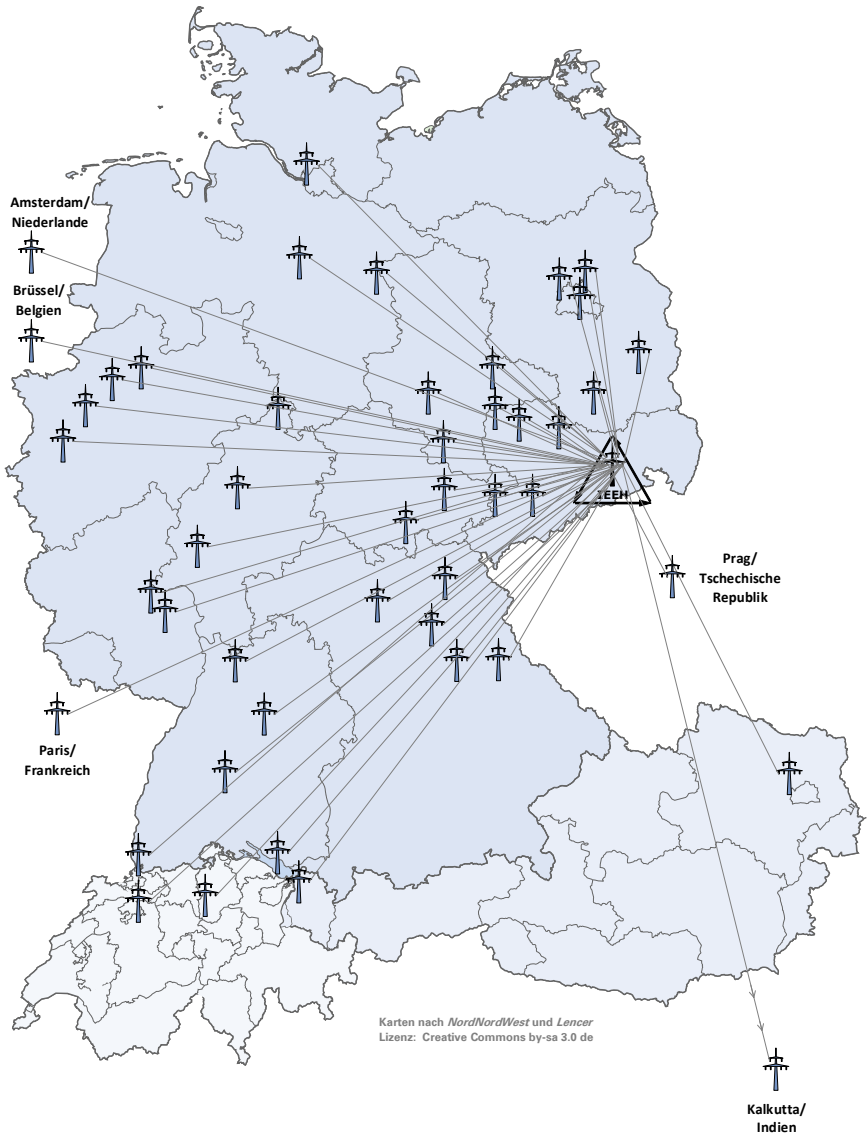
Aalto University/Finnland	PTB Braunschweig
CEN SIPAM-Centro Gestor e Operacional do Sistema de Protecao da Amazonia, Brasilien	Port Said University - Electrical Engineering Department, Ägypten
DIU Dresden International University	Red Eléctrica de España
DAMASCUS UNIVERSITY	RWTH Aachen
ETH Zürich	Suez Canal University-Faculty of Engineering-Electri- cal Department, Ägypten
Fachhochschule Dresden	Technische Universität Berlin
fem Forschungsinstitut Edelmetalle + Metallchemie	Technische Universität Braunschweig
FGW - Forschungsgesellschaft Wind e.V.	Technische Universität Chemnitz
Fraunhofer IWES	Technische Universität Darmstadt
Fraunhofer ISE	Technische Universität Graz/Österreich
Fraunhofer IVI	Technische Universität Ilmenau
Fraunhofer IKTS	Technische Universität München
Fraunhofer IWS	Technische Universität Dortmund
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg	Technische Universität Wien, Österreich
Gesellschaft für Technische Thermochemie und - physik mbH	
Helmut-Schmidt-Universität Hamburg	Tishreen University Lattakia- Fac. of Mechanical & Electrical Engineering, Syrien
Helsinki University of Technology	UFPA-Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará - Faculdade Engenharia Elétrica, Brasilien
Hochschule Zittau/Görlitz (FH)	Universität Dortmund
Hochschule Mittweida	Universität Duisburg-Essen, Campus Duisburg
Hochschule Bremen	University of Edinburgh
HTW Dresden	Universität Kassel
HTW Saarland, Saarbrücken	UNAL – Universidad Nacional de Colombia
HTWK Leipzig	Universität Rostock
Hydro Aluminium Rolled Products GmbH, Forschung & Entwicklung	Universität Siegen
INP Greifswald e.V.	Universität Stuttgart
MIKES, Finnland	Wroclaw University of Technology, Polen
MPEI Moskau Russland	Yildiz Teknik Üniversitesi
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg	
Oncoray Dresden	



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
bnNETZE 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-Württemberg 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 Hochleistungsbauelemente GmbH
GWT-TUD GmbH
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 Oensing AG
LAPP Insulator GmbH
Linde Materialhandling GmbH

LTB Leitungsbau GmbH
LTI Motion GmbH
Merck KGaA
Maschinenfabrik Reinhausen
MERSEN Deutschland FFM AG
MITNETZ Strom GmbH
Neldner Consult
Netzdienste Rhein/Main GmbH
Nexans Power Accessories Germany GmbH
NH-HH-Recyclingverein
Omicron electronics GmbH
Optocon AG
Österreichische Bundesbahnen-Holding Aktien
gesellschaft
PARTZSCH Elektromotoren e. K
Piffner 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
Stäubli Electrical Connectors AG
TEN - Thüringer Energienetze
TenneT TSO GmbH
ThyssenKrupp Aufzüge GmbH
TÜV Süddeutschland Holding AG
TransNet BW
Tyco Electronics AG
Vattenfall Europe Distribution GmbH
VEM Sachsenwerk GmbH
Werner Industrielle Elektronik - Werner GmbH



4.3 Kommissions- und Gremienarbeit

4.3.1 Lehrstuhl Elektroenergieversorgung

Dozent Dr.-Ing. Hartmut Bauer

- VDE-Ausschuss *Sicherheits- und Unfallforschung* (stv. Obmann)
- VDE Dresden Arbeitskreis AK 20 *Geschichte der Elektrotechnik* (Vorsitzender)
- VDE Dresden Arbeitskreis AK10 *Koordination der Isolation*

Dipl.-Ing. Niels Erdmann

- VDE Task Force *Perspektiven der Übertragungstechnik*
- VDE ETG Arbeitskreis *Energieversorgung 4.0*

Dipl.-Ing. Sebastian Krahmer

- VDE Dresden Arbeitskreis AK12 *Verteilungsnetze*

Dr.-Ing. Jan Meyer

- VDE Dresden Arbeitskreis AK13 *Netzurückwirkungen*
- DK CIREC und CIREC Technical Committee
- German national Committee CIGRÉ C4
- CIGRÉ Working Group C4.40
- CIGRÉ Working Group C4.42
- VDE/FNN Expertennetzwerk *Netzurückwirkungen*
- D-A-CH-CZ Arbeitsgruppe *EMV* (Technische Regeln zur Beurteilung von Netzurückwirkungen)
- DKE/UK 767.1 *Niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen* (Gastmitglied)
- CENELEC SC205A Working Group 11 *Mains Communication Systems/Immunity*

Dr.-Ing. Jörg Meyer

- VDE Dresden Arbeitskreis AK07 *Relais- und Schutztechnik*
- Mitglied des Vorstandes des VDE Dresden

Dipl.-Ing. Sebastian Palm

- Öffentlichkeitsreferent VDE Dresden

Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner

- 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 AK07 *Relais- und Schutztechnik*
- Energy Saxony Mitglied im Arbeitskreis *Speicher und Netzdienstleistungen*

Dipl.-Ing. Tobias Schnelle

- VDE (ETG) Task Force *Grundsatzstudie Gleichspannungsverteilstellen*

Dipl.-Ing. Jens Werner

- VDE Dresden Arbeitskreis AK01 *Starkstromanlagen bis 1000 V*

4.3.2 Lehrstuhl Hochspannungs- und Hochstromtechnik

Dipl.-Ing. Thomas Götz

- CIGRÉ Working Group D1.63 *Partial discharge detection under DC stress*
- CIGRÉ Working Group D1.67 *Dielectric performance of new non-SF₆ gases and gas mixtures for gas-insulated systems*

Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann

- 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.
- Schatzmeister des Vereins der Freunde und Förderer der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik e. V.
- CIGRÉ-Working Group B3.49: *Substation Clamps*
- CIGRÉ-Working Group D1.54: *Principles to measure the AC and DC resistance of conductors*
- CIGRÉ Working Group B2 *Hochspannungsfreileitungen*
- Mitglied im Förderverein Kontakte und Schalter e.V.

Dipl.-Ing. Toni Israel

- CIGRÉ Working Group D1.54 *Principles to measure the AC and DC resistance of conductors*

Dipl.-Ing. Hans-Peter Pampel

- DKE/K 214 *Ausrüstungen und Geräte zum Arbeiten unter Spannung*
- DKE/UK 214.5 *Ausrüstungen und Geräte zum Arbeiten unter Spannung; Arbeitsgeräte und starre Schutzvorrichtungen der DKE*
- VDE (ETG) Fachausschuss V2.2 *Arbeiten unter Spannung*
- CIGRÉ Working Group B2.64 *Inspection and Testing of Equipment and Training for Live-Line Work on Overhead Lines*

Dr.-Ing. Stephan Schlegel

- DKE Arbeitskreis AK 411.3 *Garnituren und Verbinder für Starkstromkabel*
- DKE Arbeitskreis AK 411.3.2 *Verbinder*

5 Veranstaltungen

Projekttag des Instituts am 16.03.2018

Der Projekttag des Instituts führte die Mitarbeiter dieses Jahr in das Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf sowie in die Gedenkstätte Bautzner Straße der Staatsicherheit der ehemaligen DDR. Das HZDR gehört heute zur Helmholtz-Gemeinschaft, der größten Forschungsgemeinschaft in Deutschland. Das Forschungszentrum Rossendorf e.V. wurde 1992 gegründet. Wir besuchten das Hochfeld-Magnetlabor Dresden (HLD), welches moderne Materialforschung in hohen Magnetfeldern betreibt. Experimente in hohen Feldern bieten Forschern einmalige Möglichkeiten, grundlegende Erkenntnisse über die uns umgebende Materie zu erlangen, denn sie erlauben in einzigartiger Weise, Materialeigenschaften gezielt und vor allem kontrolliert zu beeinflussen. Außerdem besuchten wir die Strahlungsquelle ELBE (Elektronen Linearbeschleuniger für Strahlen hoher Brillanz und niedriger Emittanz). In dieser Forschungseinrichtung werden verschiedene Arten von Sekundärstrahlen - sowohl elektromagnetische Strahlung als auch Teilchen - erzeugt.

Nach dem HZDR konnten sich die Mitarbeiter im Brauhaus am Waldschlösschen stärken, bevor es weiter in Richtung Gedenkstätte Bautzner Straße ging. Dieser historische Ort blieb seither nahezu unverändert und ist in seiner Authentizität bis heute erhalten. Er zeugt von der Allmacht des repressiven Apparats der DDR, dem viele politisch missliebige Menschen rechtlos ausgeliefert waren. Allein in der Dresdner MfS-Untersuchungshaftanstalt waren bis zum Jahr 1989 zwischen 12.000 und 15.000 politische Häftlinge untergebracht.



Fotos: Jan Keller

BeING Inside

Vom 19. – 23.03.18 fand die Projektwoche BeING Inside an der TU Dresden statt. Dabei wurden einige Schüler der Abschlussjahrgänge und ausgewählte Studienanfänger der Fakultäten Maschinenwesen, Chemie und Elektrotechnik und Informationstechnik mit der Simulation eines Industrieprojektes betraut. Der Industriepartner BASF konzeptionierte wie in den vergangenen Jahren die Aufgabenstellung. In Gruppen von zehn Personen sollten die Teilnehmer ein modernes und ausfallsicheres Energieversorgungskonzept für einen vernetzten Produktionsstandort entwickeln.



Teilnehmer des BeING Inside Projekts bei einer gruppeninternen Diskussion

Dabei stand vor allem auch die Arbeit im Team und gruppeninterne Kommunikation im Vordergrund. Innerhalb der Gruppen hatte jeder Teilnehmer eine eigene Aufgabe und trug somit ein Stück zum Gesamtergebnis bei. Promotionsstudenten der anorganischen Molekülchemie, der Energietechnik und der Hochspannungs- und Hochstromtechnik unterstützen die Teilnehmer fachlich.



Abschlusspräsentation bei BASF

Zum Abschluss wurden die jeweiligen Lösungskonzepte von den Gruppen im Kulturhaus der BASF in Schwarzheide am 23.03.2018 vorgestellt. Eine Jury, bestehend aus wissenschaftlichen Mitarbeitern und Mitarbeitern der BASF, bewertete die Ergebnisse.

„Dresdner Kreis 2018“ am 20. und 21.03.2018 in Magdeburg

Im Rahmen des Dresdner Kreises bekommen junge Doktoranden der Universitäten Magdeburg, Hannover, Dresden und Duisburg-Essen die Möglichkeit, aktuelle Forschungsthemen im Bereich der Elektrischen Energieversorgung in einem wissenschaftlichen Kolloquium zu präsentieren und anschließend zu diskutieren.

Der Dresdner Kreis fand zum 18. Mal am 20. und 21.03.2018 in Magdeburg statt. Nach dem Eintreffen an der Universität Magdeburg fuhren alle Teilnehmer zum Umspannwerk nach Wolmirstedt und wurden durch Professor Wolter begrüßt. In der alten Leitwarte des Umspannwerks präsentierten die Vortragenden Ihre Fachbeiträge. Insgesamt hatten acht Doktoranden die Möglichkeit, aktuelle Ergebnisse Ihrer Forschung aus unterschiedlichen Bereichen der Elektroenergietechnik zu präsentieren. Nach den Vorträgen wurde das Umspannwerk durch die Teilnehmer besichtigt. Am Abend konnten die Teilnehmer beim gemeinsamen Abendessen im Restaurants „Lago di Garda“ in verschiedenen weiteren Diskussionen den Tag ausklingen lassen.

Am zweiten Tag stand eine Besichtigung des Schiffshebewerks Rothensee auf dem Programm. Die Beförderung über die Magdeburger Elbe und einen Teil des Elbe-Hafel-Kanals war ein Highlight für alle Beteiligten. Allen Teilnehmern wurden interessante Fakten zur Errichtung des Hebewerks und zur Schifffahrt im Magdeburger Raum vermittelt.



Gruppenfoto aller Teilnehmer des Dresdner Kreises
in der alten Leitwarte des Umspannwerks Wolmirstedt
Foto: Universität Magdeburg

Rewe Team Challenge am 23.05.2018

Auch dieses Jahr nahmen die Mitarbeiter des Instituts an der Rewe Team Challenge 2018, einem fünf Kilometer langen Lauf, teil. Wie jedes Jahr konnten herausragende Ergebnisse erzielt werden und auch der Spaß kam nicht zu knapp.



Foto: Jan Keller

„Power“-Grill am 06.06.2018

Traditionell wurde am dies academicus der „Power“-Grill auf dem Hof hinter der Hochspannungshalle wieder von zahlreichen Studierenden genutzt, um mit den Hochschullehrern sowie Mitarbeitenden des Elektrotechnischen Instituts und des Instituts für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik ins Gespräch zu kommen. Mit Grillgut und gekühlten Getränken wurden Informationen zur Vertiefungsrichtung Elektroenergie-technik im Hauptstudium ausgetauscht und anschließend durch die Labore geführt. In Gesprächen wurde über aktuelle Forschungsthemen und Praktikumsversuche der Institute informiert. Anschließend wurde der Nachmittag in lockerer Atmosphäre genutzt, um Fragen zu beantworten und Erfahrungen auszutauschen.

17. Dresdner Lange Nacht der Wissenschaften

Die mittlerweile 17. Dresdner Lange Nacht der Wissenschaften fand in diesem Jahr am 15. Juni 2018 statt. Das Institut war mit zwei Aktivitäten beteiligt.

Zum einen wurden wieder spannende allgemeine Phänomene der Hochspannungstechnik und deren praktische Anwendungen vorgestellt. Es wurde wieder über aktuelle Forschungsinhalte und Projekte informiert und zu den einzelnen Schwerpunkten in der Hochspannungshalle des Institutes faszinierende Live-Experimente gezeigt. Die Veranstaltung wurde unter dem Namen: „Faszination Elektrizität – Experimentalvortrag zu hochspannungstechnischen Phänomenen und technischen Lösungen“ angeboten.



Experimentalvortrag in der Hochspannungshalle
Foto: IEEH

Mit der 2. angebotenen Aktivität „hatten wir den Bogen raus“. Unter den Titel „Strom – sehen, hören und riechen“ stellte das Institut den neuen Lichtbogenversuchsstand am NARC mit spannenden Vorführungen und Erläuterungen zum Thema Störlichtbögen und deren Einfluss auf die Elektroenergieversorgung vor.



Lichtbogenvorführung am NARC
Foto: Jan Keller



Publikum am Lichtbogenversuchsstand
Foto: Jan Keller

Beide Veranstaltungen erfreuten sich hoher Beliebtheit und waren mit über 300 Besuchern sehr gut besucht.

Assistentenfahrt der Professur Hochspannungs- und Hochstromtechnik in die Fränkische Schweiz, 22.-24.06.2018

Die diesjährige Assistentenfahrt führte die Angehörigen der Professur Hochspannungs- und Hochstromtechnik mit ihren Familien in die Fränkische Schweiz. Zur Begrüßung gab es am Freitagabend im Hotel in Gräfenberg ein traditionelles fränkisches „Schäufele“-Essen. Der Samstag begann mit einer Paddeltour auf der Wiesent. Bei dem etwas kühlen Wetter war die Erfrischung, die das Paddeln für manche unfreiwillig brachte, nur bedingt willkommen. Trotzdem konnten alle die landschaftliche Schönheit der Region mit ihren grünen Tälern und beeindruckenden Felsformationen genießen.

Nach einer kurzen Mittagspause ging es auf einen Abschnitt des traditionellen „5-Seidla-Steigs“. Dieser Bierwanderung ist eine der beliebtesten und bekanntesten der Region und führt in voller Länge an fünf kleinen Brauereien vorbei, die jeweils zum Verweilen einladen. In einer abgekürzten Variante konnte die Gruppe zwei der Brauereien kennenlernen. Insbesondere die Spezialitäten des Elchbräu in Thuisbrunn erfreuten sich großer Beliebtheit. Der zweite Stopp bei Brauerei Hoffmann in Hohenschwärz wurde dann auch zum Abendessen genutzt, bevor die Gruppe – teilweise in einer Gastwirtschaft in Hohenschwärz, teilweise zurück im Hotel – den Sieg der deutschen Nationalmannschaft über Schweden verfolgen konnte.



Die Teilnehmer der Assistentenfahrt 2018 vor der Neuen Residenz in Bamberg
Foto: Julia Oberst

Am Sonntag stand noch eine Stadtführung durch Bamberg auf dem Programm, die allen die Geschichte der Stadt von den Erzbischöfen bis zum Sams näher brachte und mit kulinarischen Highlights im Klosterbräu und der Riffelmacher-Eisdiele ein rundum gelungenes Wochenende beendete.

„26. Kolloquium Hochspannungs- und Anlagentechnik“ an der TU München 28.-30.06.2018

Eine lang gepflegte Tradition ist das *Kolloquium Hochspannungs- und Anlagentechnik*. Auch dieses Jahr fanden sich die Professoren und wissenschaftlichen MitarbeiterInnen der technischen Universitäten Darmstadt, München, Ilmenau und Dresden sowie der Hochschule Zittau/Görlitz zusammen. Dank der tadellosen Organisation der Münchner KollegInnen konnten viele spannende Themen präsentiert und diskutiert werden. Das Interesse der rund 40 TeilnehmerInnen an den unterschiedlichsten Themen war groß, sodass oftmals intensivere Diskussionen in die Kaffeepausen verschoben werden mussten. Neben den mittlerweile „klassischen“ Themen der Hochspannungstechnik wie HGÜ-Technik und alternativen Isoliergasen, lernten die TeilnehmerInnen Aspekte der thermischen Modellierung, fraktaler Analyse von Hilbert-Spektren oder bodenphysikalischen Eigenschaften nahe Energiekabelsystemen kennen.

Abwechslung schaffte das sehr gute Rahmenprogramm. In den Werkstätten der Zahnradbahn an der Zugspitze konnte auch betagtere Technik bestaunt werden. Dass diese immer noch tadellos funktioniert bewies die Fahrt hinauf bis auf das Zugspitzplatt. Nachdem die letzten Höhenmeter per Seilbahn überwunden waren, bot sich ein wechselhaftes Schauspiel aus Wolken und Sicht bis ins Alpenvorland. Der Weg hinab ins Tal wurde dann mit der 2017 neu eröffneten Seilbahn Zugspitze zurückgelegt.



Gruppenfoto vor der neuen Zugspitzbahn

Foto: Tobias Gabler



Übergabe der Gastgeschenke

Foto: Tobias Gabler

Beim mittelalterlichen Rundgang durch die Innenstadt Münchens am ersten Abend wurde der Nachtwächter nicht müde zu betonen, wie stark sich doch alles verändere „in unseren modernen Zeiten“. Ganz im Zeichen der Veränderung stehen auch die nächsten Jahre des Kolloquiums. Da es das voraussichtlich letzte Kolloquium von Prof. Dr.-Ing. Kindersberger als Lehrstuhlinhaber an der Gastgeberuniversität war, werden sich auch personelle Neuerungen ergeben. Betont wurde deshalb, dass es umso wichtiger sei, an solchen langlebigen Traditionen festzuhalten um den wissenschaftlichen Austausch der Universitäten zu gewährleisten. Dementsprechend wird das Kolloquium 2019 am IEEH der TU Dresden stattfinden.

Studentenexkursion am 13.07.2018

Im Rahmen der Vorlesung Elektroanlagenprojektierung findet regelmäßig eine Exkursion in ein Umspannwerk des städtischen Energieversorgers (DREWAG) statt. Die diesjährige Besichtigung fand am 13.07.2018 statt. Besichtigt wurde das 110/20/10-kV-Umspannwerk Dresden-Räcknitz. Die Studenten erhalten damit die Möglichkeit die praktische Anwendung des in der Vorlesung theoretisch vermittelten Wissens kennenzulernen. Abgerundet wurde der Besuch durch die fachkundige Führung eines kompetenten DREWAG Mitarbeiters.



Foto: Jörg Meyer

Studentenexkursion zu Omexom

Im Rahmen der Vorlesung *Ausgewählte Kapitel der Elektrischen Energietechnik* konnten die Studierenden auch dieses Jahr das Trainings- und Schulungszentrum der Firma Omexom in Korbußen, Thüringen, besuchen. Omexom baut und wartet Freileitungen. Da es keinen Ausbildungsberuf Freileitungsmonteure in Deutschland gibt, sind die Tätigkeiten im Trainingszentrum der Firma umso wichtiger. Durch den Netzausbau werden in Deutschland zukünftig schätzungsweise 4500 Freileitungsmonteure benötigt. Omexom geht davon aus, dass es derzeit rund 1500 Monteure gibt. Um hohe Sicherheits- und Qualitätsstandards einzuhalten, bietet die Firma an ihrem Standort Lehrgänge zur *Fachkraft Leitungsmonteure* an.

Für die Studierenden gab es einen praktischen Einblick in die täglichen Tätigkeiten, die vor Ort gelehrt werden. So konnten die acht Exkursionsteilnehmer ausprobieren, wie AlSt-Pressverbinder angebracht oder Leiterseile mit Hilfe von Spiralen repariert werden. Spätestens beim Erklettern eines Freileitungsmastes mit Hilfe verschiedener innovativer Steigsysteme wurde klar, dass dieser Beruf durchaus körperliche Fitness und Schwindelfreiheit verlangt.



Anbringen eines Abstandshalters im
Schulungswagen
Foto: Omexom



Austesten innovativer Steigsysteme
Foto: Omexom

Es wurde deutlich gezeigt, dass die Wartung und Errichtung der Übertragungsleitungen Zeit und Arbeitseinsatz verlangt. An erster Stelle steht jedoch stets die elektrische und Höhensicherheit der Monteure.

Das Erlangen von Verständnis der Prozesse und Arbeitsschritte, die mit dem voranschreitenden Netzausbaues einhergehen, ist Ziel der jährlich angebotenen Vorlesung. Vielen Dank an dieser Stelle sowohl an Herrn Dr.-Ing. habil. K. Papailiou für das Engagement in der Vorlesung und die Organisation der Exkursion sowie den engagierten Mitarbeitern im Trainings- und Schulungszentrum von Omexom!

BDEW-Kongress vom 12.-14. Juli 2018 in Berlin

Wie schon im vergangenen Jahr fand der Kongress des Bundesverbandes für Energie- und Wasserwirtschaft in diesem Sommer in der STATION-Berlin statt. Passend zum diesjährigen Motto „Tempo“ gab es innerhalb der zwei Kongresstage eine Vielzahl spannender Vorträge und Diskussionsrunden zu Themen wie der vernetzten Stadt, Digitalisierung und E-Mobilität. Neben politischen Inputs von der Bundesministerin für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit Svenja Schulze und dem Bundesminister für Energie und Wirtschaft Peter Altmaier wurden darüber hinaus Interessen und Gedanken von Vertretern aus der Wirtschaft ausgetauscht. Die Nachwuchsinitiative des BDEW konnte in diesem Jahr ihr 10-jähriges Bestehen feiern und ermöglichte wieder rund 100 Studierenden und jungen Fachkräften die Teilnahme am Kongress sowie einem spannenden Rahmenprogramm, das mit einem Besuch im benachbarten Technischen Museum Berlin begann. Das IEEH war mit zwei Studentinnen und einem Studenten vertreten.



Die Teilnehmer der Nachwuchsinitiative vor der STATION in Berlin

Foto: IEEH

18th International Workshop on High Voltage Engineering vom 17. bis 21.09.2018 in Cottbus

Das Team Hochspannungstechnik der Professur für Hochspannungs- und Hochstromtechnik reiste im Rahmen des nunmehr 18. „International Workshop on High Voltage Engineering“ für drei Tage an die Brandenburgische-Technische Universität Cottbus. Die traditionelle Veranstaltung dient dem fachlichen und kulturellen Austausch mit den Kollegen aus Cottbus, Stuttgart, München, Magdeburg, Posen und Breslau. Die zahlreichen Fachvorträge aus den Gebieten der Hochspannungstechnik und der elektrischen Energiesysteme bildeten den aktuellen Stand der Forschung an den beteiligten Lehrstühlen ab. Dabei zeigte sich im Gebiet der Hochspannungstechnik ein besonderer Fokus auf Gleichspannungsanwendungen, der Teilentladungsmessung und der Charakterisierung von Isolierstoffen. Das vielfältige Rahmenprogramm beinhaltete unter anderem eine Besichtigung des Leichtbaulabors, des „Power System Simulator“ im Zentrum für Energietechnologie, des Hochspannungslabors inklusive der Klimaprüfkammer, der Anwendung eines Smart Grids und der Einbindung von Energiespeichern auf dem Campus der Universität. Dabei wurde deutlich, dass der Strukturwandel in dieser Region sowohl bei der fachlichen Arbeit, als auch bei der persönlichen Diskussion eine omnipräsente Rolle spielt.

Neben dem fachlichen Austausch stand am Abend der kulturelle Austausch zwischen den deutschen und polnischen Kollegen mit einem „Get-Together“ und einem Grillabend vor der Hochspannungshalle des Instituts im Mittelpunkt.

Wir freuen uns über die Einladung des Instituts für Energieübertragung und Hochspannungstechnik zum nächsten Workshop an die Universität Stuttgart.



Gruppenfoto der Teilnehmer

Foto: Khrystyna Shakhmatova, BTU Cottbus-Senftenberg

Tag der Fakultät 2018

Am 28. September 2018 fand der Tag der Fakultät statt. Bei der Veranstaltung wurden unsere Absolventinnen und Absolventen feierlich verabschiedet und die besten Studien- und Promotionsleistungen ausgezeichnet. Zuvor wurde in zwei Vortragsblöcken der Fachrichtung Elektroenergie-technik die Schwerpunktthemen der Professuren Leistungselektronik, Elektroenergieversorgung und Hochspannungstechnik sowie Elektrische Maschinen und Antriebe vorgestellt. Ergänzend wurde in einer Posterausstellung die aktuellen Lehrveranstaltungen, Forschungsthemen und Kooperationsprojekte dem Fachpublikum vorgestellt. Die Veranstaltung fand diesmal im Görgesbau statt, der mit seiner technischen Ausstellung zu elektrischen Maschinen ein passendes Ambiente bot.

Am späten Nachmittag eröffnete der Dekan Prof. Dr. phil. nat. R. Tetzlaff die Absolventenverabschiedung und nach einem Grußwort der Universitätsleitung rundete ein Festvortrag zum Thema „Die weiteste Reise der Menschheit“ von Prof. Dr.-Ing. habil. J. Lienert das Programm ab. Der Abend klang mit einem Buffet in der Alten Mensa, begleitet von einem Konzert der Band Sunshine Dixieland aus.

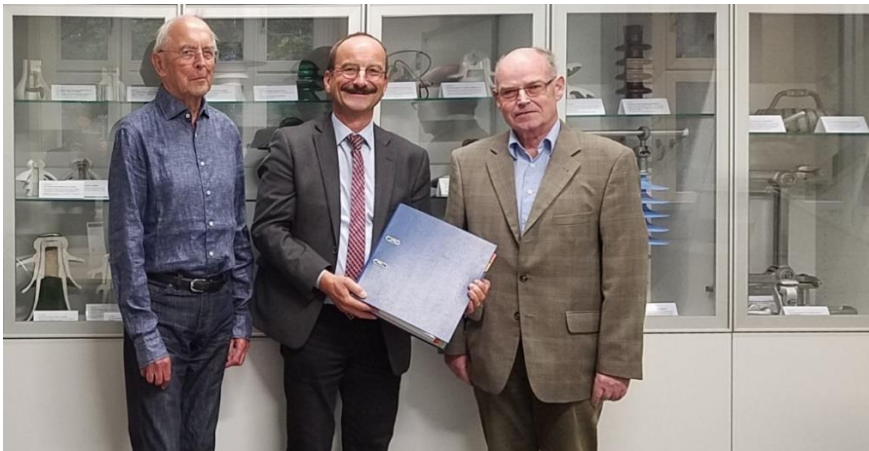


Foto: Lukas Lorenz

Übergabe der Technischen Sammlung Hochspannungstechnik

Über Jahrzehnte wurden an der Professur Hochspannungs- und Hochstromtechnik historische und zeitgenössische Exponate zur Hochspannungstechnik gesammelt, um den Studierenden zu den unterschiedlichsten Themen stets geeignetes Anschauungsmaterial in Lehrveranstaltungen präsentieren zu können. Gleichzeitig wird damit die technische Entwicklung auf diesem Fachgebiet dokumentiert. In jahrelanger Kleinarbeit haben ehemalige wissenschaftliche Mitarbeiter des Instituts, Herr Dr.-Ing. Eberhard Engelmann, Herr Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Schwarzer und Herr Dr.-Ing. Horst Klengel, den Bestand gesichtet, mit Hilfe der Institutswerkstatt unter Leitung von Herrn Dipl.-Ing. Hans-Peter Pampel aufgearbeitet und registriert. Zu jedem Exponat wurden umfangreiche Recherchen angestellt und in wissenschaftlich-technisch präziser Form in einer Dokumentation zu der über 250 Exponaten zählenden Sammlung zusammengestellt. Am 25. Oktober 2018 wurde diese Dokumentation dem Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik übergeben. In einer Übersicht sind alle Sammlungsstücke wohlgeordnet zu finden und mit der Chronik verlinkt, sodass alle Mitarbeiter des Instituts auf das Bildmaterial, die technischen Parameter, die historische Entwicklung und die aus wissenschaftlicher Sicht bemerkenswerten Aspekte zugreifen können. Ein öffentlicher Zugang zur Datenbank ist in Vorbereitung. Die Sammlungsstücke selbst können in einer kleinen Auswahl im Binderbau BIN 131 besichtigt werden. Für die nahe Zukunft gilt es, die Dokumentation der Technischen Sammlung Hochspannungstechnik der TU Dresden in die zentrale Kustodie der Universität einzubinden. In einem weiteren Schritt sollen neben den Isolatoren und Hochspannungsarmaturen auch Sammlungsstücke der Hochstrom- und Verbindungstechnik erfasst und wissenschaftlich aufgearbeitet werden.

Dem fleißigen Wirken aller an der Aufarbeitung der Sammlung Beteiligten gilt ein ganz herzliches Dankeschön für die geleistete, herausragende Arbeit.



Die Übergabe der Dokumentation zur Technischen Sammlung Hochspannungstechnik im Binderbau durch Dr. Eberhard Engelmann und Prof. Klaus Schwarzer

Foto: IEHH

Anfahrtsskizze

Sitz des Institutes:

Mommsenstr. 10/12 (Binderbau/Toeplerbau)

Sekretariate: BIN 124/125

01069 Dresden



So finden Sie zu uns:

- Vom Flughafen Dresden mit S-Bahnlinie S 2 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).