

# Jahresbericht 2023

INSTITUT FÜR ELEKTRISCHE ENERGIEVERSORGUNG  
UND HOCHSPANNUNGSTECHNIK





# Vorwort

Sehr geehrte Mitarbeiter:innen, Partner:innen und Freunde des Instituts für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik,

die vergangenen zwölf Monate waren am Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik (IEEH) durch intensive Forschungs- und Lehraktivitäten geprägt, die wir Ihnen gerne wieder vorstellen möchten. Den Jahresbericht 2023 wollen wir auch nutzen, um Sie über aktuelle Entwicklungen, insbesondere am Institut, aber auch an der Fakultät und der TU Dresden zu informieren.

Im letzten Jahresbericht stellten wir dar, dass die drei vakanten Professuren im Bereich der elektrischen Energietechnik neu besetzt werden. Der Berufungsprozess ist derzeit noch nicht abgeschlossen. Es ist zu erwarten, dass die ersten Besetzungen für die neuen Professuren im kommenden Jahr erfolgen werden.

Die elektrische Energieversorgung bildet zunehmend die zentrale Drehscheibe der gesamten Energieversorgung einer nachhaltig agierenden, modernen Gesellschaft. Am IEEH widmen wir uns der kontinuierlichen Erforschung und Entwicklung von innovativen Technologien und Systemen, um eine effiziente, zuverlässige und nachhaltige Energieversorgung für die Zukunft zu gewährleisten.

Ein wesentlicher Aspekt ist hierbei die Nutzung von Gleichspannung (DC) für die Übertragung hoher Leistungen in allen Spannungsebenen. Wir sind daher sehr stolz berichten zu können, dass in der Hochspannungshalle erfolgreich ein neues modulares 1,2-MV-Gleichspannungsprüfsystem in Betrieb genommen wurde. Dieses Großgerät konnte über die Großgeräteinitiative der Länder finanziert werden. Damit ist am IEEH sichergestellt, dass die Ausbildung von Elektroenergie techniker:innen, sowie die Forschung in der Hochspannungstechnik auch zukünftigen Anforderungen im vollen Umfang gerecht wird.

Dies wird unterstrichen durch neue Forschungsprojekte auf dem Gebiet der Gleichspannungssysteme. So startet zum Beispiel im Februar nächsten Jahres die zweite Phase des Projektes AC2DC. Vier wissenschaftliche Mitarbeiter:innen werden sowohl Aspekte der Strom- und Spannungsqualität und des Selektivschutzes in DC-Netzen, als auch der Spannungs- und Strombelastung von DC-Komponenten erforschen. Innerhalb der nächsten vier Jahre werden, neben umfangreichen Laboruntersuchungen, gemeinsam mit Industriepartnern auch ein Feldversuch realisiert werden.

Eine weitere wichtige Aktivität auf diesem Gebiet ist das Vorhaben gemeinsam mit anderen sächsischen Hochschulen einen DC-Campus zu errichten. Darüber hinaus wurde mit der University of Canterbury in Christchurch (Neuseeland), dort wird auch intensiv auf dem Gebiet der DC-Netze geforscht, eine enge Kooperation vereinbart.

Die dargestellten Vorhaben sind nur ein Beispiel zahlreicher weiterer Forschungsaktivitäten, die ohne die Unterstützung und vertrauensvolle Zusammenarbeit mit unseren Industriepartnern und TU Dresden internen als auch externen Forschungseinrichtungen nicht möglich gewesen wären. Dafür möchten wir uns herzlich bedanken und freuen uns auf eine weitere intensive und erfolgreiche Kooperation.

Wie in jedem Jahr geben Ihnen unsere wissenschaftlichen Mitarbeiter: innen wieder einen Überblick zu ihren aktuellen Forschungsthemen. Auch in diesem Jahr wurden zahlreiche Mitarbeiter: innen für ihre hervorragenden Veröffentlichungen und Forschungsergebnisse ausgezeichnet. Diese herausragenden wissenschaftlichen Leistungen wurden durch die kollegiale Zusammenarbeit der wissenschaftlichen, administrativen und technischen Bereiche des IEEH ermöglicht. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass immer mehr zentrale Verwaltungsaufgaben dezentralisiert werden und damit der Verwaltungsaufwand in den Instituten erheblich steigt.

Die Gesamtzahl der im ersten Semester immatrikulierten Studierenden an der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik hat sich auf einem stabilen, wenn auch niedrigen Niveau eingependelt. Erfreulich ist der Anstieg der Immatrikulationszahlen im Studiengang Elektrotechnik. Dies spiegelt eine verstärkte Nachfrage und Interesse an diesem Fachgebiet wider. In den anderen Studiengängen, insbesondere auch im Studiengang „Regenerative Energiesysteme“, sind hingegen weiterhin rückläufige Immatrikulationen zu verzeichnen. Diese Entwicklung konnte an der Fakultät jedoch durch den erfolgreichen Start des neuen Studiengangs „Biomedizinische Technik“ ausgeglichen werden. Die Einführung dieses interdisziplinären Studiengangs hat dazu beigetragen, die Immatrikulationszahlen zu stabilisieren.

Dennoch ist die Anzahl der Studierenden in den Ingenieurwissenschaften alarmierend gering. Eine Studie des VDI vom Februar 2023 zeigt, dass im Bereich der Energie- und Elektrotechnik auf einen Absolventen acht offene Stellen kommen. Es ist daher von entscheidender Bedeutung, gemeinsam mit allen Beteiligten Strategien zu entwickeln, um dem steigenden Fachkräftemangel in den Ingenieurwissenschaften effektiv entgegenzuwirken und die Lücke zwischen Angebot und steigender Nachfrage zu schließen.

Um in der Lehre einen praxisnahen Bezug zu schaffen und zeitgemäße wissenschaftlich-technische Themen zu vermitteln, konnten wir erneut die Erfahrungen und das Fachwissen externer Experten für ausgewählte Vorlesungen gewinnen. Dafür möchten wir uns herzlich bei Herrn Hon.-Prof. Dr. Konstantin Papailiou, Herrn Dr. Winfried Fricke, Herrn Dr. habil. Frank Schmuck, Herrn Dr. Sergey Gortschakow, Herrn Dr. Thomas Heinz, Herrn Dr. Thomas Jordan, Herrn Dr. Dirk Kunze, Frau Dr. Maria Kosse, Herrn Dipl.-Ing. Thomas Dietrich, Herrn Dr. Gerd Kitzrow und Herrn Dr. Frank Berger bedanken. Darüber hinaus unterstützen uns durch eigenständige Lehrveranstaltungen Herr Hon.-Prof. Dr. Gert Hentschel, Herr Hon.-Prof. Dr. Matthias Hable, Herr Dipl.-Ing. Jörg Schindler, Herr Dr. Philipp Stachel und Prof. Dr. Jörg Meyer. Auch bei ihnen möchten wir uns für ihr großes Engagement in der Lehre bedanken.

Nach der Corona-Pandemie wurde der Lehrbetrieb im letzten Jahr wieder in den gewohnten Formen vollumfänglich aufgenommen. Dies betrifft sowohl die Vorlesungen, Übungen als auch die Praktika. Parallel hat die Universitätsleitung begonnen, die technischen Voraussetzungen zu schaffen und auszubauen, um in Zukunft auch neue digitale Formen des Lehrangebotes zu realisieren.

Auch nach dem Ende der Corona-Pandemie wird, sofern es arbeitstechnisch möglich ist, allen Mitarbeiter:innen die Möglichkeit geboten, mobil zu arbeiten. Dies soll Flexibilität und individuelle Arbeitsmodelle fördern.

Unseren ehemaligen Mitarbeitern gilt unserer besonderer Dank. Dr. Hartmut Bauer, Dr. Eberhard Engelmann, Prof. Steffen Großmann, Dr. Helmut Löbl und Dr. Joachim Speck haben uns erneut mit ihrem fachkundigen Rat und ihrer tatkräftigen Unterstützung zur Seite gestanden.

Abschließend möchten wir uns herzlich bei allen Mitarbeiter:innen des Instituts, allen Freunden und Partnern für ihre tatkräftige Mitarbeit und unermüdliche Unterstützung bedanken.

Wir wünschen Ihnen ein gesundes, erfolgreiches und frohes Jahr 2024 und freuen uns auf die weitere intensive Zusammenarbeit.

Dresden, Dezember 2023



Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner



PD Dr.-Ing. habil. Stephan Schlegel



Prof. Dr.-Ing. habil. Jan Meyer

# Inhaltsverzeichnis

<b>Personelle Besetzung</b>	<b>5</b>
Institutsleitung .....	5
Lehrstuhl Elektroenergieversorgung.....	5
Lehrstuhl Hochspannungs- und Hochstromtechnik.....	7
Labor und Werkstatt .....	9
<b>Lehre</b>	<b>10</b>
Lehrveranstaltungen.....	10
Lehrveranstaltungen für das Grundstudium .....	10
Lehrveranstaltungen für das Hauptstudium .....	10
Lehrexport an andere Fakultäten – Grundstudium .....	12
Studentische Arbeiten .....	13
Studienarbeiten und Forschungspraktika .....	13
Diplom- und Masterarbeiten .....	14
Studentischer Newsletter.....	16
<b>Forschung</b>	<b>17</b>
Lehrstuhl Elektroenergieversorgung.....	18
Forschungsschwerpunkte und Forschungsprojekte .....	18
Publikationen .....	67
Lehrstuhl Hochspannungs- und Hochstromtechnik.....	76
Forschungsschwerpunkte und Forschungsprojekte .....	76
Publikationen .....	110
National Arc fault Research Center.....	112
Herausgabe eines Fachbuches.....	114
Preise und Auszeichnungen .....	115
Promotionen .....	119
<b>Kooperationen</b>	<b>121</b>
Kooperationen National .....	121
Wissenschaftskooperationen .....	121
Industriekooperationen .....	121
Kooperationen International .....	123
Wissenschaftskooperationen .....	123
Industriekooperationen .....	123
Kommissions- und Gremienarbeit.....	125
Lehrstuhl Elektroenergieversorgung.....	125
Lehrstuhl Hochspannungs- und Hochstromtechnik.....	126
<b>Veranstaltungen</b>	<b>127</b>
<b>Kontakt</b>	<b>139</b>

Titelbild: Neues modulares 1200-kV-Gleichspannungs-Prüfsystem in der Hochspannungshalle des Instituts

Foto: Dipl.-Ing. Hans-Peter Pampel

# Personelle Besetzung

## Institutsleitung

<b>Titel</b>	<b>Nachname</b>	<b>Vorname</b>	<b>Telefon (0351-463-)</b>
<i>Leiter des Instituts</i>			
Prof. Dr.-Ing.	Schegner	Peter	34374

## Lehrstuhl Elektroenergieversorgung

<b>Titel</b>	<b>Nachname</b>	<b>Vorname</b>	<b>Telefon (0351-463-)</b>
<i>Kommisarischer Leiter der Professur</i>			
Prof. Dr.-Ing. habil.	Meyer	Jan	35102

### *Professoren und Hochschullehrer im Ruhestand*

Dozent Dr.-Ing.	Bauer	Hartmut	
-----------------	-------	---------	--

### *Professoren, Dozenten und Lehrbeauftragte*

Dr.-Ing.	Berger	Frank	
Hon.-Prof. Dr.-Ing.	Hable	Matthias	
Hon.-Prof. Dr.-Ing.	Hentschel	Gert	
Prof. Dr.-Ing.	Meyer	Jörg	
Dipl.-Ing.	Schindler	Jörg	
Dr.-Ing.	Stachel	Philipp	

### *Sekretärin*

	Sprotowsky	Corinna	33202
--	------------	---------	-------

### *Projektkoordinator*

Dipl.-Ing.	Keller	Jan	35432
------------	--------	-----	-------

<b>Titel</b>	<b>Nachname</b>	<b>Vorname</b>	<b>Telefon (0351-463-)</b>
<i>Wissenschaftliche Mitarbeiter:innen</i>			
Dr.-Ing.	Blanco	Ana Maria	32482
Dipl.-Ing.	Bruhns	Michael	35088
Dr.-Ing.	Domagk	Max	35223
Dipl.-Ing.	Fiedler	Laura	36132
Dipl.-Ing.	Frowein	Karla	37869
Dipl.-Ing.	Gasch	Etienne	43206
M. Sc.	Hemken	Matthias	40438
Dipl.-Ing.	Herrmann	Ricardo	40764
M. Sc.	Jäschke	Christian	35353
M. Sc.	Khokhlov	Victor	43208
Dipl.-Ing.	Krahmer	Sebastian	39993
Dipl.-Ing.	Kreutziger	Marcus	43202
Dipl.-Ing.	Liebermann	Carlo	43204
Dipl.-Ing.	Luhnau	Deborah Tabea	33725
Dipl.-Ing.	Ma	Liya	43080
Dipl.-Ing.	Müller	Sascha	43210
Dipl.-Ing.	Nguyen	Thanh Binh	43200
Dipl.-Ing.	Potyka	Marta Sophia	43203
M. Sc.	Pourarab	Morteza	40665
Dipl.-Ing.	Rasti	Sasan Jacob	40766
Dipl.-Ing.	Schmidt	Maximilian	43081
Dipl.-Ing.	Stiegler	Robert	32217
M. Eng.	Zyabkina	Olga	40535
M. Sc.	Zhang	Yinan	32941
<i>Technische Angestellte</i>			
	Lemke	Gunter	35272

## Lehrstuhl Hochspannungs- und Hochstromtechnik

<b>Titel</b>	<b>Nachname</b>	<b>Vorname</b>	<b>Telefon (0351-463-)</b>
<i>Kommissarischer Leiter der Professur</i>			
Privatdozent Dr.-Ing. habil.	Schlegel	Stephan	32746 Fax 37157
<i>Professoren und Hochschullehrer im Ruhestand</i>			
Dr.-Ing.	Engelmann	Eberhard	
Prof. Dr.-Ing.	Großmann	Steffen	
PD Dr.-Ing. habil.	Löbl	Helmut	
Dr.-Ing.	Speck	Joachim	
<i>Dozenten und Lehrbeauftragte</i>			
Dr.-Ing.	Fricke	Winfried	
Dr.	Gortschakow	Sergey	
Dr.-Ing.	Thomas	Heinz	
Dr.-Ing.	Gerd	Kitzrow	
Dr.-Ing.	Kunze	Dirk	
Hon.-Prof. Dr. techn. Dr.-Ing. habil.	Papailiou	Konstantin	
Dr.-Ing.	Kosse	Maria	
Dr.-Ing. habil.	Schmuck	Frank	
Dr.-Ing.	Jordan	Thomas	
<i>Sekretärin</i>			
	Neubert	Carola	33428
<i>Projektkoordinatorin</i>			
M. A.	Taubeneck	Katrin	33307

*Wissenschaftliche Mitarbeiter:innen*

---

Dr.-Ing.	Adam	Robert	34789
Dipl.-Ing.	Büttner	Lukas	bis 09/2023
M. Sc.	Dowbysch	Andreas	40522
Dipl.-Ing.	Elspaß	Lena	40517
Dipl.-Ing.	Gödicke	Markus	40519
Dr.-Ing.	Hildmann	Christian	33917
M. Sc.	Hoffmann	Johannes	33608
Dipl.-Ing.	Huter	Max	40519
M. Sc.	Kiefer	Jörg	bis 09/2023
Dipl.-Ing.	Linde	Thomas	40520
Dipl.-Ing.	Linke	Johanna	40518
Dipl.-Ing.	Pampel	Hans-Peter	33103
Dipl.-Ing.	Pomsel	Michelle	34756
Dipl.-Ing.	Pietzonka	Johanna	36105
Dipl.-Ing.	Schindler	Alexander	38704
Dipl.-Ing.	Schladitz	Markus	33080
Dipl.-Ing.	Sokolowski	Michal	40523
Dipl.-Ing.	Ullrich	Moritz	34756

---

*Technische Angestellte*

---

Dipl.-Ing (FH)	Göres	Axel	32613
----------------	-------	------	-------

---

**Labor und Werkstatt**

<b>Nachname</b>	<b>Vorname</b>	<b>Telefon (0351-463-)</b>
Dittrich	Ralf	34745
Dipl.-Ing. (FH) Eusewig	Falk	40608
Gläser	Michael	34757
Jaroszinsky	Gerd	34745
Knorrn	Jan-Erik	34260
Knüpfel	Helge	34260
Wöhling	Henri	34260
Reichelt	Eric	34745

# Lehre

## Lehrveranstaltungen

### Lehrveranstaltungen für das Grundstudium

Vorlesungen / Übungen / Praktika	SS	WS
<i>Modul Elektroenergie-technik</i>		
Elektroenergie-technik <i>Prof. Meyer, PD Dr. Schlegel</i>		3/1/0
Praktikum Elektroenergie-technik	0/0/1	

### Lehrveranstaltungen für das Hauptstudium

Vorlesungen / Übungen / Praktika	SS	WS
<i>Modul Hochspannungs- und Hochstromtechnik</i>		
Hochspannungs- und Hochstromtechnik <i>PD Dr. Schlegel</i>		2/1/0
Praktikum Hochspannungs- und Hochstromtechnik		0/0/1
<i>Modul Grundlagen elektrischer Energieversorgungs-systeme</i>		
Betriebsmittel und Berechnungsgrundlagen für elektrische Energieversorgungs-systeme <i>Prof. Meyer</i>		2/1/0
Grundlagen der Elektroenergieanlagen <i>Prof. Meyer</i>		1/1/0
<i>Modul Betrieb elektrischer Energieversorgungs-systeme</i>		
Betrieb elektrischer Energieversorgungs-systeme <i>Prof. Meyer</i>	2/1/0	
Praktikum I: Elektroenergiesysteme	0/0/1	
Praktikum II: Hochspannungstechnik 2	0/0/1	
<i>Modul Oberseminar Elektrische Energieversorgung</i>		
Oberseminar Elektrische Energieversorgung <i>Prof. Meyer / PD Dr. Schlegel</i>		0/2/0

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

<b>Vorlesungen / Übungen / Praktika</b>	<b>SS</b>	<b>WS</b>
<i>Weitere Vertiefungsfächer</i>		
Elektrische Lasten und Lastmanagement <i>Prof. Meyer</i>		1/1/0
<i>Ausgewählte Kapitel der Elektrischen Energietechnik</i>		
Freileitungsbau Hochspannungsgeräteentwicklung <i>PD Dr. Schlegel / Dr. Papailiou / Gastdozenten</i>	2/1/0	
Projekte im Übertragungsnetz Artificial Intelligence Applied to Smart Grids <i>Dr. Berger / Dr. Domagk</i>		2/1/0

### **Lehrexport an andere Fakultäten – Grundstudium**

<b>Vorlesungen / Übungen / Praktika</b>	<b>SS</b>	<b>WS</b>
Hochspannungs- und Hochstromtechnik (für Wirtschaftsingenieure) <i>PD Dr. Schlegel</i>		2/1/1
Grundlagen der Elektrotechnik (VNT und WW) (für die Fakultät Maschinenwesen) <i>PD Dr. Schlegel</i>		2/2/0/1
Praktikum Grundlagen der Elektrotechnik (VNT) ab WS20/21 (für die Fakultät Maschinenwesen) <i>PD Dr. Schlegel</i>		0/0/2/0
Elektroenergietechnik (für Wirtschaftsingenieure) <i>Prof. Meyer, PD Dr. Schlegel</i>	0/0/1	3/1/0
Elektroenergietechnik (für Lehramt an berufsbildenden Schulen) <i>Prof. Meyer, PD Dr. Schlegel</i>	0/0/1	3/1/0
Elektroenergietechnik (für Lehramt an Oberschulen WTH) <i>Prof. Meyer, PD Dr. Schlegel</i>		1/1/1
Einführungsseminar Elektroenergietechnik (für Lehramt an Oberschulen WTH) <i>Prof. Meyer</i>	2/0/0	

---

## Studentische Arbeiten

### Studienarbeiten und Forschungspraktika

Weber, Friedemut

*Aktualisierung und Erweiterung der Steuerung des dynamischen Netzmodells auf Stations- und Netzleitebene*

09/2022 (Betreuer: Dipl.-Ing. Herrmann)

Löw, Vincent

*Aufbau eines Versuchsstandes zur verteilten Kontaktwiderstandsmessung*

12/2022 (Betreuer: Dr.-Ing. Israel/Dr.-Ing. Hildmann)

Gestrich, Jonas

*Analyse supraharmonischer Resonanzen im Niederspannungsnetz mittels systematischer Simulationen*

13/2022 (Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Meyer)

Michel, Maximilian

*Einfluss zyklischer mechanischer Belastung auf das dielektrische Verhalten des Isoliersystems dynamisch betriebener rotierender Hochspannungsmaschinen*

14/2022 (Betreuerin: Dipl.-Ing. Elspaß)

Wiesner, Martin

*Vergleich von Methoden zur Berücksichtigung volatiler Einspeisung von Wind- und PV-Parks bei der Auslegung von Netzbetriebsmitteln*

15/2022 (Betreuer: Nilges M.Sc.)

Steffen, Nicolai

*Einfluss harmonisch verzerrter Spannungen auf die Zersetzung von Isolierfolien durch Oberflächenentladungen*

16/2022 (Betreuer: Dipl.-Ing. Linde)

Ullmer, Jan

*Untersuchungen zu Fehlern in Gleichstromanlagen*

17/2022 (Betreuer: Dipl.-Ing. Bruhns)

Groß, Oliver

*Untersuchungen zu Optimal Power Flow Calculation Ansätzen in Niederspannungsnetzen und simulative Erprobung in einem Beispielnetz*

18/2022 (Betreuerin: Dipl.-Ing. Fiedler)

Grobitzsch, Katharina

*Laboraufbau eines Power-Hardware-in-the-Loop-Systems und Untersuchungen zur Echtzeitfähigkeit für das Combined Energy Lab 3.0*

19/2022 (Betreuer: Dipl.-Ing. Rasti)

Leide, Jakob

*Aufbau eines dynamischen Modells der elektrischen Energieversorgung einer Elektrolyseanlage zur Untersuchung des Systemverhaltens*

02/2023 (Betreuer: Dipl.-Ing. Bruhns)

Kutter, Keran

*Systematische Analyse von Einflussfaktoren für die Genauigkeit des Distanzschutzes in Netzen mit VSM (virtuelle Synchronmaschine) Einspeisung*

03/2023 (Betreuer: Zhang M.Sc.)

## **Diplom- und Masterarbeiten**

Melnychuk, Olga

*Untersuchungen zu allgemeingültigen Parametern zur Auslegung stromführender Schraubenverbindungen*

05/2022 (Betreuerin: Dipl.-Ing. Pomsel)

Huter, Max

*Elektrisch-thermisches Betriebs- und Langzeitverhalten stromführender Verbindungen mit mehrdrähtigen Leitern*

07/2022 (Betreuer: Dipl.-Ing. Gödicke/Dr.-Ing. Hildmann)

Seidel, Eric

*Erweiterung eines Bewertungssystems zur effizienten Darstellung der Spannungsqualität*

08/2022 (Betreuer: Dipl.-Ing. Gasch)

Scholtz, Stephan

*Messung und Modellierung der frequenzabhängigen Netzimpedanz in öffentlichen Niederspannungsnetzen im FCC-Frequenzband (150 kHz – 500 kHz)*

09/2022 (Betreuer: Dipl.-Ing. Khokhlov)

Wu, Jiajing

*Entwicklung hybrider Modelle zur Simulation von Niederspannungs-störlichtbögen unter Berücksichtigung der Lichtbogenwanderung*

10/2022 (Betreuer: Dipl.-Ing. Bruhns)

Schmitt, Jonas

*Analyse von Kriterien zur Beurteilung der Spannungsstabilität in elektrischen Verteilnetzen mit hohem Anteil von dezentralen Energiewandlungsanlagen*

11/2022 (Betreuer: Dipl.-Ing. Krahrmer)

Pietzonka, Johanna

*Einfluss des Verlaufes einer zusammengesetzten Prüfspannung auf die elektrische Festigkeit von Schwefelhexafluorid*

12/2022 (Betreuer: Dowbysch M.Sc.)

Martin, Ronny

*Lastmanagement in Niederspannungsnetzen - technische und wirtschaftliche Bewertung verfügbarer Lösungen*

14/2022 (Betreuer: Dipl.-Ing. Schmidt)

Behle, Fabian

*Bestimmung der elektrischen Parameter eines geschichteten Erdreichs*

01/2023 (Betreuer: Dipl.-Ing. Liebermann/Dr.-Ing. Ossevorth)

Teschler, Paul

*Untersuchungen zur Gasdichtheit von stromführenden Schraubenverbindungen*

02/2023 (Betreuer: Dr.-Ing. Hildmann)

Strunz, Elias

*Analyse der Effizienz von Filterkonzepten für die Reduktion von Harmonischen in vermaschten Übertragungsnetzen*

03/2023 (Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Meyer)

Nguyen, Thanh Binh

*Erarbeitung eines Modells zur Berechnung der Nullimpedanz von Freileitungen unter Berücksichtigung der endlichen Leitungslänge und Zusatzwiderständen an den Erdungspunkten von Erdseilen*

04/2023 (Betreuer: Dipl.-Ing. Liebermann)

Fuchs, Wilhelm Alexander

*Untersuchung von Verfahren zur Abschaltung dezentraler Erzeuger bei einpoligen Fehlern im Mittelspannungsnetz*

05/2023 (Betreuer: Dipl.-Ing. Herrmann)

Wang, Changyuan

*Untersuchung der Netzzrückwirkungen von Kunden mit Eigenbedarfsoptimierung mittels Photovoltaik und Speicher*

06/2023 (Betreuer: Dipl.-Ing. Stiegler)

Hofmann, Rebecca

*Berücksichtigung von Unsicherheiten in Optimal Power Flow Algorithmen für das Engpassmanagement*

07/2023 (Betreuer: Dipl.-Ing. Fiedler)

Jarosczyński, Willy

*Untersuchungen zum Teilentladungsverhalten frei beweglicher metallischer Partikel in gasisolierten Systemen mit alternativen Isoliertgasen bei Wechselspannungsbelastung*

08/2023 (Betreuer: Dipl.-Ing. Linke)

## **Studentischer Newsletter**

Der Studentische Newsletter richtet sich an Studierende der Elektroenergietechnik sowie alle anderen Interessierten. Der Newsletter erscheint monatlich und informiert über interessante Veranstaltungen sowohl am IEEH, an der Fakultät E&I, des VDE Dresden und energy Saxony. Seit diesem Jahr wird auch vermehrt über online-Angebote informiert. Pro Newsletter werden einzelne der am Institut ausgeschriebenen Studien- und Diplomarbeiten näher beschrieben, während alle Aufgabenstellungen in der zugehörigen OPAL-Gruppe zu finden sind. Genauso werden am Institut ausgeschriebene SHK- und WHK-Stellen veröffentlicht sowie Praktikums- und Jobausschreibungen und Stipendien externer Firmen der Elektroenergietechnik vorgestellt. Bei Interesse können sich an der TU Dresden immatrikulierte Studierende in die OPAL-Gruppe „Studierende am IEEH“ einschreiben. Externe wenden sich dahingehend bitte per Email an unsere Social-Media-Anlaufstelle [ieeh\\_som@tu-dresden.de](mailto:ieeh_som@tu-dresden.de).

# Forschung

Nachfolgend möchten wir Sie über unsere Forschungsaktivitäten, Publikationen und ausgewählte forschungsbezogene Ereignisse informieren. Zusätzlich zu unserem Jahresbericht können Sie über verschiedene Dienste fortlaufend Informationen über die Aktivitäten am IEEH erhalten.



Forschungsinformationssystem der TU Dresden  
<https://tud.link/7daf>



<https://www.researchgate.net/lab/Peter-Schegner-Lab-3>



<https://www.researchgate.net/lab/High-Voltage-Laboratory-at-Technische-Universitaet-Dresden-Steffen-Grossmann>

Über die Forschungsinfo der TU Dresden erhalten Sie u. a. umfassende Kurzinformationen über Publikationen, Abschlussarbeiten und Forschungsprojekte. Eine weitere Möglichkeit detaillierte Informationen zu ausgewählten Publikationen zu erhalten, bietet sich unter den beiden Professurseiten auf dem alternativen Dokumentenserver ResearchGate.

## Lehrstuhl Elektroenergieversorgung

### Forschungsschwerpunkte und Forschungsprojekte

Die Veränderungen in der elektrischen Energieversorgung sind überall spürbar. Neben der Integration von dezentralen und dargebotsabhängigen Energieerzeugungsanlagen (Wind- und Photovoltaik-Anlagen) werden zunehmend auch Elektrofahrzeuge, Speicher und energieeffiziente Geräte an das Niederspannungsnetz angeschlossen. Darüber hinaus erfolgt die Integration von kleinen und kleinsten Blockheizkraftwerken, sogenannten 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 eines Kalibriersystems für Stromsensoren bis 150 kHz
- Modellierung von Stromwandlern unter Berücksichtigung einer Remanenz

### Planung und Betrieb von Netzen

- Stochastische bottom-up Modellierung von Niederspannungsnetzlasten
- Netzausbauplanung in Verteilnetzen unter veränderten und unscharfen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen
- Energiewende Sachsen im transnationalen Kontext - Strategien und Lösungsansätze für ein nachhaltigeres Energieversorgungssystem
- Entwicklung zellular organisierter Energiesysteme mit fraktaler Struktur
- Stabilitätsbetrachtung für dezentrale Energiewandlungsanlagen in Verteilnetzen
- Systemdienstleistungen in Flächenverteilnetzen
- Sternpunktbehandlung in Verteilnetzen
- Einbindung von DC-Leitungen in Verteilnetze und Auslegung hybrider AC-DC-Netze

### Power Quality

- Einfluss moderner Leistungselektronik (z.B. Elektrofahrzeuge und Photovoltaik-Wechselrichter) auf die Strom- und Spannungsqualität im Niederspannungsnetz

- Modellierung von Photovoltaik-Wechselrichtern zur Untersuchung harmonischer Instabilitäten
- Netzverträglichkeit in öffentlichen Niederspannungsnetzen im Frequenzbereich von 2 kHz bis 150 kHz (Ursachen, Ausbreitung, Modellierung, Störfestigkeit)
- Methoden zur Berechnung von Emissionsgrenzwerten für Kundenanlagen sowie deren messtechnischer Nachweis (Harmonische, Zwischenharmonische, Supra-harmonische und Unsymmetrie)
- Messung und Modellierung der Ausbreitung von Harmonischen im Verteilungs- und Übertragungsnetz
- Invasive und nichtinvasive Methoden zur Bestimmung der frequenzabhängigen Netzimpedanz
- Messtechnische Bestimmung des frequenzabhängigen Übertragungsverhaltens von Strom- und Spannungswandlern
- Neue Verfahren zur automatisierten, ortsübergreifenden Analyse und Visualisierung der Strom- und Spannungsqualität bei großen Datenmengen
- Automatisierte Algorithmen zur Erkennung von NetZRückwirkungen
- Untersuchungen zur Strom- und Spannungsqualität in Inselnetzen
- Internetbasierte Austauschplattform für gemessene Oberschwingungsspektren von Haushaltsgeräten; PANDA (equipment hArmoNic Database)

## **Schutz- und Leittechnik**

- Untersuchung stromstarker Niederspannungsstörlichtbögen am National Arc fault Research Center (NARC)
- Algorithmenentwurf zur schnellen Detektion von Störlichtbögen
- Auswirkungen der verstärkten Einbindung von Stromrichtern in das Übertragungsnetz auf das Netzschutzsystem
- Grundlagen des übergeordneten Schutzes von elektrischen Transport- und Verteilungsnetzen (Systemschutz)
- Entwurf von Schutzkonzepten für ausgewählte Betriebsmittel
- Entwurf digitaler Schutzalgorithmen
- Auswertung von Störfallaufzeichnungen
- Modellierung von Strom- und Spannungswandlern zur Beurteilung der Tauglichkeit im Schutzsystem
- Detaillierte Modellierung von Freileitungen zur Untersuchung des Systemverhaltens unter Berücksichtigung realer Anordnungen
- Untersuchung des Einflusses der elektromagnetischen Verkopplung von Übertragungsstrecken auf die Genauigkeit des Schutzsystems im Fehlerfall
- Modellierung von Übertragungstrecken zur Untersuchung der eingekoppelten Spannung und des Lichtbogenstroms beim Auftreten von sekundären Lichtbögen während der AWE-Pause
- Grundlagenuntersuchung zum Schutz bei Zwischensystemberührungen

## Smart Grid

- Smart Energy Management - Intelligentes Energiemanagement von Strom, Gas, Wärme und Kälte
- Combined Energy Lab - thermisch und elektrischer Versuchsstand zur Analyse von Prosumern
- Planungs- und Betriebsalgorithmen für zellulare Energieversorgungssysteme
- Netzzustandsidentifikation und Phasenerkennung in Verteilnetzen
- Planwertbasiertes und operatives Engpassmanagement in Verteilnetzen
- Netzdienliche Integration von Elektrofahrzeugen in das Niederspannungsnetz
- Automatisierte Analyse von Lasten und Lastgruppen in Niederspannungsnetzen
- Automatisierte Parameteridentifikation, energetische Bewertung und Optimierung des Betriebs von dezentralen Energieanlagen
- Prognosealgorithmen für Energieerzeugung und -verbrauch mittels Maschinelles Lernen

## Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Energie- und Messwandler“



Christian Jäschke, M. Sc.

### Entwicklung eines symmetrisch aufgebauten Messkreises für ein Kalibriersystem für Stromsensoren bis 150 kHz

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



In einem Verbundforschungsprojekt mit Condensator Dominit, QMK, Spitzenberger & Spies und der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) wird ein Kalibriersystem für Stromsensoren entwickelt. Der Fokus liegt dabei auf der Bestimmung des Übertragungsfehlers von in Energieversorgungsnetzen eingesetzten Stromsensoren bei höherfrequenten Stromanteilen. Ein Leistungsverstärker generiert einen niederfrequenten (NF) Strom von bis zu 1500 A bei einer Netznennfrequenz von 16,7 Hz, 50 Hz, 60 Hz oder 400 Hz, um die Stromsensoren adäquat auszusteuern. Parallel dazu erzeugt ein zweiter Verstärker den höherfrequenten (HF) Prüfstrom von bis zu 50 A bei Frequenzen bis zu 150 kHz.

Untersuchungen der PTB zeigten, dass für eine präzise Messung mit dem Referenzstromwandler der Messkreis im Kalibriersystem so aufgebaut werden muss, dass die Rückführung symmetrisch um den Wandler angeordnet wird. Ein unsymmetrischer Aufbau würde insbesondere bei hohen Frequenzen zu erheblichen Messabweichungen führen. Dieses Fehlverhalten kann durch die vergleichsweise großen magnetischen Feldstärkeüberhöhungen im Stromwandlerkern erklärt werden, die bei unsymmetrischer Rückführung durch die darin fließenden Ströme bewirkt werden. Diese Feldstärkeüberhöhungen können den magnetischen Kern des Stromwandlers partiell sättigen oder signifikante Störspannungen in den entsprechenden Wicklungsabschnitt induzieren, was die Funktion des Wandlers beeinträchtigt. Daher wurde ein Leitersystem für den Messkreis entworfen, das eine möglichst symmetrische Struktur aufweist und durch die Ströme in den Rückleitern keine signifikanten Feldstärkeüberhöhungen im Kern des Referenzstromwandlers verursacht. Darüber hinaus sollte das Leitersystem so gestaltet sein, dass es einfach zu fertigen ist und einen schnellen und unkomplizierten Austausch der Prüflinge ermöglicht.

Bild 1 zeigt den entworfenen Messkreis, der durch FEM-Simulationen optimiert wurde.

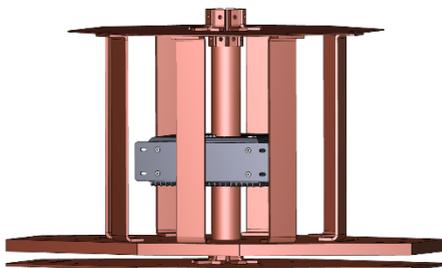


Bild 1: Messkreis mit Referenzstromwandler

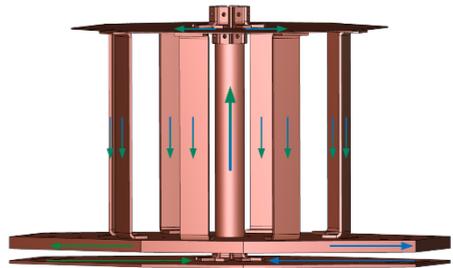


Bild 2: Strompfade im Messkreis

Wie in Bild 2 dargestellt, erfolgt die Einspeisung der HF- und NF-Ströme jeweils von einer Seite in die untere Einspeiseplatte des Messkreises. Die Überlagerung aus HF- und NF-Prüfstrom fließt durch den zentral platzierten zylindrischen Leiter, der als Primärleiter für den Prüfling und den Referenzstromwandler fungiert. In der oberen Platte des Messkreises werden die Ströme zu den äußeren, kreisförmig angeordneten Stromschienen geleitet. Die Kontaktierung ist dabei so konzipiert, dass die obere Platte einfach demontiert werden kann, um den Prüfling zu wechseln. In den äußeren Stromschienen fließen die Ströme zur oberen Einspeiseplatte zurück, wo die HF- und NF-Stromkreise über die HF- und NF-Einspeisung geschlossen werden. Dabei ist die obere Einspeiseplatte deutlich dicker als die untere und besitzt spezielle Fräsungen, durch die die HF- und NF-Stromdichten so gesteuert werden, dass die HF- und NF-Stromanteile in allen Rückleiter-Stromschienen annähernd gleich groß sind.

Bild 3 zeigt die durch FEM-Simulation bestimmte Verteilung der magnetischen Flussdichte entlang eines Zylinders um den Innenleiter des Messkreises, dessen Radius gleich dem Außenradius des in Bild 1 gezeigten Referenzstromwandlers ist.

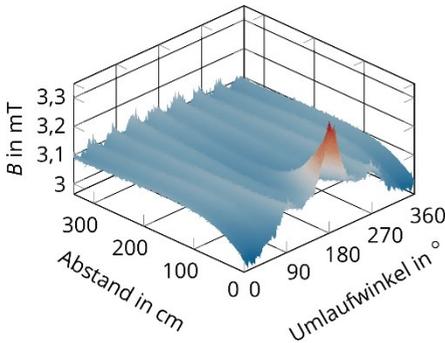


Bild 3: Magnetische Flussdichte entlang eines Zylinders, der dem Außenradius des Referenzstromwandlers entspricht

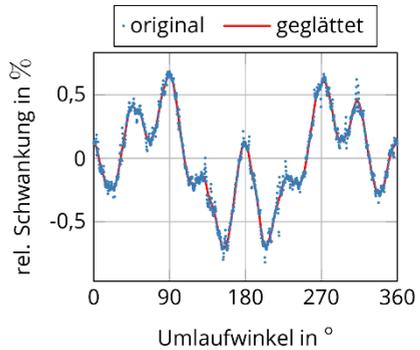


Bild 4: Relative Schwankung der in Bild 3 dargestellten magnetischen Flussdichte vom Mittelwert bei einem Abstand von 100 mm

Bei der Simulation wurde einseitig ein Strom von 1500 A eingespeist. Der Feldverlauf in Bild 3 zeigt, dass die magnetische Flussdichte ab einem Abstand ca. 100 mm (bezogen auf die untere Einspeiseplatte) lediglich eine geringe Schwankung im Abhängigkeit des Umlaufwinkels aufweist. Bild 4 zeigt, dass die Schwankung der magnetischen Flussdichte bei einem Abstand von 100 mm kleiner als  $\pm 1\%$  ist. Für einen Abstand  $< 100$  mm treten größere Schwankungen auf, was darauf zurückzuführen ist, dass die magnetische Flussdichte in diesem Bereich noch signifikant von der Stromdichte in den Einspeiseplatten bestimmt wird. Das Rauschen der Simulationsergebnisse in Bild 4 ist auf die Diskretisierung des 3D-FEM-Modells zurückzuführen.

Um eine negative Beeinflussung des Referenzstromwandlers zu vermeiden, sollte dieser aufgrund der Simulationsergebnisse mindestens 100 mm von den Einspeiseplatten entfernt positioniert werden. Im nächsten Schritt wird der Messkreis in die Fertigung gegeben und getestet.



**Matthias Hemken, M. Sc.**

**Frequenzgangmessungen von  
Mittelspannungstransformatoren:  
- Fokus auf den Einfluss des Messaufbaus**

In elektrischen Energieversorgungsnetzen treten zunehmend transiente Vorgänge mit steilen Flanken auf, die beispielsweise durch Vakuum-Leistungsschalter verursacht werden. Gleichzeitig nehmen quasistationäre höherfrequente Anregungssignale, die hauptsächlich durch Umrichter erzeugt werden, zu. Beide Phänomene können Resonanzen in elektrischen Betriebsmitteln anregen und zu irreparablen Schäden führen. Besonders gießharzisierte Mittelspannungstransformatoren sind hierdurch gefährdet. Zur gezielten Auslegung von Filtern kann eine Frequenzgangmessung, beispielsweise mittels Sweep Frequency Response Analysis (SFRA), durchgeführt werden. Hierbei kann der Messaufbau jedoch einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse einer SFRA Messung haben, was anhand einer einfachen Spulengeometrie nachfolgend vorgestellt wird.

Für die SFRA-Messung wird ein Messsystem gemäß Bild 1 verwendet. Dieses besteht aus einem DA-Wandler, Linearverstärker, Trennverstärkern, AD-Wandler und einem Messcomputer. Im Frequenzbereich von 1 kHz bis 150 kHz beträgt der maximale Amplitudenmessfehler des Messsystems  $\Delta\epsilon < 0,12\%$ . Mit abnehmender Frequenz steigt die Genauigkeit; bis 100 kHz bereits auf  $\Delta\epsilon < 0,03\%$ .

Gleichzeitig treten im vollständigen Messkreis parasitäre Kapazitäten aufgrund des Tastkopfs und der Messkabel auf, die insbesondere an der im Leerlauf betriebenen Sekundär-

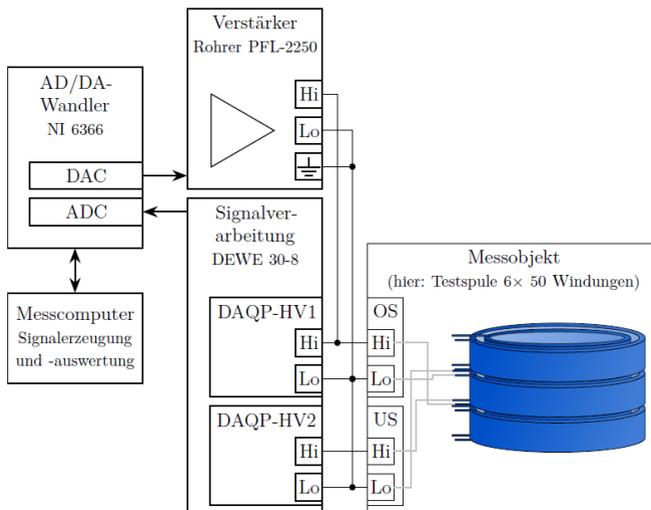


Bild 1: Schematische Darstellung des Aufbaus des Messsystems

seite der Spulenkonfiguration wirken können. Deren Auswirkungen werden nachfolgend anhand einer Doppel-Testspule mit je 200 Windungen auf der Primär- und Sekundärseite veranschaulicht. Dazu wurden unterschiedliche Kabel sowie Potentialverhältnisse untersucht und mit Messungen verglichen.

Bild 2 zeigt das gemessene frequenzabhängige Übertragungsverhalten der inneren zur äußeren Spule bei den unterschiedlichen Szenarien. Grundsätzlich zeigen alle Verläufe eine 9- bis 10-fache Resonanzüberhöhung im oberen zweistelligen kHz-Bereich, die aufgrund der Spuleninduktivität sowie parasitäre Kapazitäten innerhalb der Spule hervorgerufen wird. Die Frequenzgänge verdeutlichen jedoch, dass das Resonanzverhalten stark durch den Messaufbau beeinflusst wird. Bei sekundärseitig schwebendem Potential mit kurzen Messkabeln ( $C \approx 50 \text{ pF}$ ) beträgt die Resonanzfrequenz 69,2 kHz, während bei langen Kabeln mit definiertem Bezugspotential auf der Sekundärseite ( $C \approx 500 \text{ pF}$ ) die Resonanzfrequenz des Gesamtsystems auf 57,5 kHz absinkt. Weitere Messungen mit parasitären Kapazitäten von rund 65 pF und 240 pF bewegen sich innerhalb dieses Bereichs. Die FEM-Simulationsergebnisse des Spulenaufbaus ohne bzw. mit parasitärer sekundärseitiger Kapazität von 500 pF zeigen vergleichbare Auswirkungen auf die Resonanzfrequenzen: Die Resonanzfrequenz sinkt von 68,4 kHz auf 58,3 kHz. Bei den hier verglichenen Messkabeln und Verschaltungen führt der Messaufbau zu einer Abweichung von bis zu 15 % in den ermittelten Resonanzfrequenzen. Bezüglich der Resonanzüberhöhung sind die Abweichungen mit maximal 6 % etwas geringer. Bei der Resonanzüberhöhung ist jedoch auffällig, dass die Änderung erst bei einem Wechsel des Kabels auftritt, was ggf. auf dessen Induktivität zurückzuführen ist.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine präzise SFRA-Messung nicht nur hochgenaue Messinstrumente, sondern auch eine detaillierte Analyse und Kompensation der parasitären Einflüsse erfordert, um genaue und verlässliche Ergebnisse zu gewährleisten. Weiterhin ist bereits aus diesen Ergebnissen erkennbar, dass eine Bewertung von Transformatorresonanzen nur bei einer Betrachtung des Gesamtsystems zielführend und sinnvoll ist.

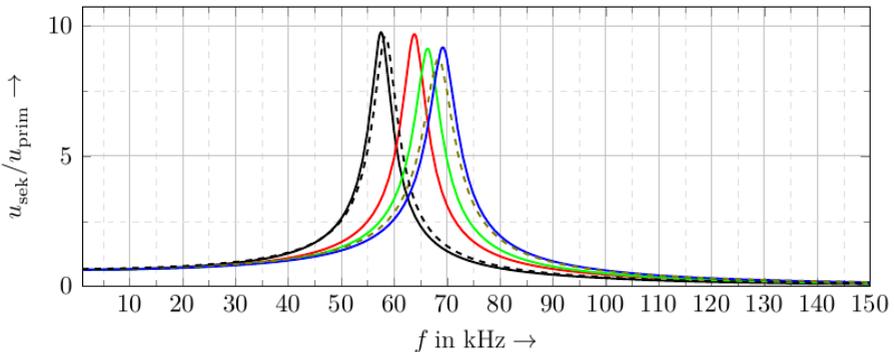


Bild 2: Vergleich der SFRA-Messungen für verschiedene Messaufbauten (3 m geschirmtes Messkabel: — sekundärseitig bezogen, ca. 500 pF; — sekundärseitig schwebend, ca. 240 pF; 1 m Laborkabel: — sekundärseitig bezogen ca. 65 pF; — sekundärseitig schwebend ca. 50 pF) incl. Vergleichssimulationen (-- mit Messsystem, 500 pF; - - ohne Messsystem 0 pF)

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



Karla Frowein, Dipl.-Ing.

### Modellumgebung zur Bewertung eines Mittelspannungsnetzes hinsichtlich gefährlicher Erdschluss-Restströme

In Mittelspannungsnetzen muss für den sicheren Betrieb und für die Planung des Netzausbaus sichergestellt werden, dass im Falle eines einpoligen Erdfehlers die Berührungsspannung  $U_T$  die zulässige Berührungsspannung  $U_{Tp}$  entsprechend DIN VDE 0101-2 nicht überschreitet ( $U_T \leq U_{Tp} = 80 \text{ V}$ ). Diese Spannung ist abhängig von der Impedanz am Fehlerort  $Z_F$ , über der sie abfällt und dem Erdschluss-Reststrom  $I_{RES}$ , der durch diese Impedanz fließt.

In Netzen mit Resonanzsternpunktterdung wird der im Fehlerfall fließende kapazitive Erdschlussstrom  $I_{CE}$  weitgehend durch den induktiven Strom  $I_L$  der Erdschluss-Kompensationspule kompensiert. Dies ist jedoch für Anteile mit höherer Frequenz nicht möglich. Relevante Harmonische im Erdschluss-Reststrom sind  $I_{RES \nu}$  mit  $\nu = 3, 5, 7$ , wobei  $\nu$  die Ordnungszahl der Harmonischen ist.

Um das Gefahrenpotential abzuschätzen, das hinsichtlich der Berührungsspannung  $U_T$  aus dem harmonischen Anteil des Erdschluss-Reststromes  $I_{RES \nu}$  resultiert, wird ein Berechnungstool entwickelt, das aufgrund der Netzdaten eines Mittelspannungsnetzes und der am Hoch-/Mittelspannungstransformator gemessenen harmonischen Spannungen  $U_\nu$  an jedem Knoten im Netz die Höhe des Erdschluss-Reststroms darstellt und so Stationen identifiziert die hinsichtlich der Resistanz der Erdungsanlage  $R_E$  und der Berührungsspannung  $U_T$  überprüft werden sollten.

Da unterschiedliche Parameter zur Ausprägung des Erdschluss-Reststromes beitragen, werden diese dann variiert um einen Worst Case zu berechnen. Zu diesen Parametern gehören unter anderen die Größe und Position der Harmonischen Quellen  $I_{Q\nu}$ , der Lastzustand, die am Fehlerort im Fall des einpoligen Erdfehlers wirksame frequenzabhängige Impedanz  $Z_{Fehlerort}(f)$  und die Fehlerimpedanz  $Z_F$ .

Exemplarisch wird hier auf den Einfluss des Ortes der Harmonischen Quellen  $I_{Q\nu}$  auf den Erdschluss-Reststrom  $I_{RES \nu}$  eingegangen. Betrachtet wird ein Netz mit verteilter Erdschluss-Kompensation, das hier für die weitere Betrachtung in Teilnetz A und Teilnetz B aufgeteilt wurde. Der Ort der Harmonischen Quellen  $I_{Q\nu}$  wird von Knoten 1 bis Knoten 3 verschoben, wobei der einpolige Erdfehler an Knoten 3 eingelegt wird (Bild 1).

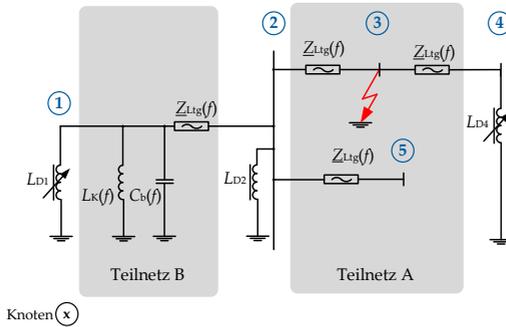


Bild 1: Vereinfachte Darstellung des betrachteten Beispielnetzes

In Bild 2 sind die harmonischen Erdschluss-Restströme  $I_{RES\ v}$  für  $v = 4, 5, 7$  in Abhängigkeit des Ortes der harmonischen Stromquelle dargestellt. Hierbei ändern sich die Quellenströme  $I_{Qv}$  auch, da sie abhängig von ihrer Position aus den an Knoten 2 gemessenen Spannungen  $U_v$  jeweils neu berechnet werden ( $I_{Qv\ K1} \neq I_{Qv\ K2} \neq I_{Qv\ K3}$ ).

Abhängig von der Position der harmonischen Quelle teilt sich der Strom, der im Fall eines einpoligen Erdfehlers über die Fehlerstelle fließt, über die Netzzeigwe auf. Damit wird aus Sicht der Stromquelle ein Stromteiler wirksam, der über der Fehlerstelle zu einem Anteil des harmonischen Erdschluss-Reststromes  $I_{RES\ v}$  führt [1]. Die von dem Ort der Quelle abhängige Stromaufteilung resultiert aus der wirksamen Impedanz zwischen Fehlerort und der platzierten Stromquelle (Bild 3). Da die injizierten Ströme der Quellen die gemessenen Spannungen am Knoten 2 ausprägen, sind die Größenordnungen der platzierten Ströme abhängig von der Lage der Stromquellen. So ist der harmonische Anteil des Erdschluss-Reststroms bei Quelle an Knoten 2 größer, da im Fehlerfall nur ein Teil des Stromes  $I_{Qv}$  durch das Teilnetz A ( $Z_A$ ) fließt.

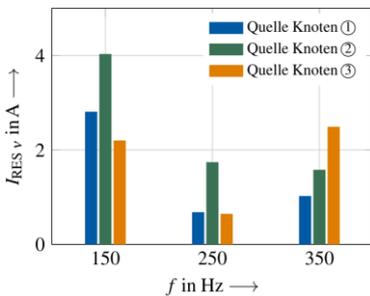


Bild 2: Harmonische Anteile im Erdschluss-Reststrom  $I_{RES\ v}$  in Abhängigkeit des Ortes der harmonischen Stromquellen  $I_{Qv}$

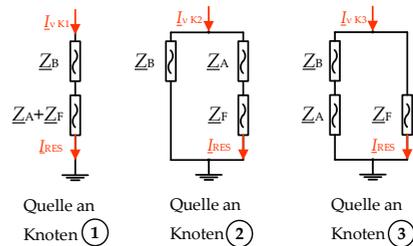


Bild 3: Vereinfachte Darstellung des Strompfades in Abhängigkeit des Ortes der harmonischen Stromquellen  $I_{Qv}$

[1] K. Frowein, U. Schmidt, J. Hänsch, G. Druml., P. Schegner, "Modell zur Berechnung der Grund- und Oberschwingungsanteile des Erdschluss-Reststroms in Mittelspannungsnetzen", STE 2017 - Sternpunktbehandlung in Netzen bis 110 kV (D-A-CH), Aschaffenburg



**Sebastian Kraemer, Dipl.-Ing.**

**Berücksichtigung von  
Umrichterinteraktionen dezentraler  
Erzeugungsanlagen bei der (N-1)-  
Sicherheitsbewertung in Verteilnetzen**

Gefördert durch  
**DFG** Deutsche  
Forschungsgemeinschaft

Die Resilienz eines Energieversorgungssystems bezieht sich auf den Grad, in dem das System in der Lage ist, Störungen ohne Unterbrechung der Kundenversorgung zu überstehen. Dabei erweist sich der Zweiklang aus robuster Systemauslegung und kontinuierlicher Systembeobachtung als Mittel der Wahl um gewählte Sicherheitskenngrößen sowohl im statischen als auch transienten Beobachtungsraum einzuhalten [1]. Eine Netzsicherheitsbewertung – prädiktiv als auch kurativ – bildet die Grundlage für das zuvor genannte Konzept. Dies gilt insbesondere in Hinblick auf volatile DEA-Erzeugungscharakteristiken und unprognostizierbares Verbraucherverhalten. Durch die Optimierung von Blindleistungsarbeitspunkten kann der Abstand eines aktuellen Netzbetriebspunktes zu den (Spannungs-) Grenzen des ihn umgebenden sicheren Betriebsbereiches verbessert werden [2]. Bei der Wahl einer spannungsabhängigen Blindleistungsbereitstellung, der sogenannten  $Q(U)$ -Regelung, für dezentrale Energieanlagen (DEAs) können Umrichterinteraktionen auftreten, die in einer Stabilitätsbewertung berücksichtigt werden müssen.

### Systemmodellierung

Elektroenergiesysteme können im zeitdiskreten Betrachtungsraum modelliert werden. Die Autoren von [3] entwickelten darauf aufbauend ein Verfahren zur Stabilitätsbewertung in Hinblick auf Umrichterinteraktionen, gültig jedoch nur für Strahlennetze. Durch weiterführende Arbeiten am Institut konnte dieser Ansatz auf allgemeine Netzstrukturen erweitert [4] und letztlich für eine praxisrelevante Anwendung im Bereich der Netzsicherheitsbewertung adaptiert werden [5]. Bild 1 zeigt den resultierenden Spannungsregelkreis einer umrichtergespeisten DEA mit  $Q(U)$ -Regelung für ein mit mehreren Anlagen ausgestattetes Gesamtsystem. Die Dynamik des Blindleistungsregelkreises lässt sich hierbei auf einen Tiefpass erster Ordnung reduzieren, der durch die Filterkonstante

$$\lambda := 1 - \exp(-t_s/t_f) \quad (1)$$

definiert ist. In dessen Definition stellt  $t_f$  die Filterzeitkonstante des realen kontinuierlichen Tiefpassfilters der DEA-Blindleistungsregelung dar.

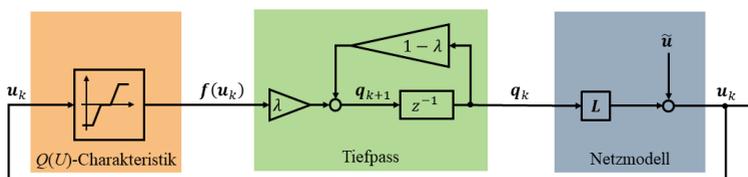


Bild 1: Diskrete Spannungsregelkreise von dezentralen Erzeugungsanlagen mit  $Q(U)$ -Regelung (Gesamtsystem in Vektordarstellung; Diskretisierungsvariable  $k$ )

Unter Berücksichtigung des Netzbetriebsfalls  $\mathcal{O}$  kann das vereinfachte lineare Netzmodell

$$\mathbf{u} = \mathbf{L}(\mathcal{O})\mathbf{q} + \tilde{\mathbf{u}}(\mathcal{O}) \quad (2)$$

mit  $\mathbf{L}(\mathcal{O})$  als arbeitspunktabhängiger Sensitivität der Knotenspannungen gegenüber den Blindleistungsänderungen  $Q(U)$ -geregelter Knoten abgeleitet werden. So erhält man

$$\mathbf{q}_{k+1} = (1 - \lambda)\mathbf{q}_k + \lambda\mathbf{f}(\mathbf{L}(\mathcal{O})\mathbf{q}_k + \tilde{\mathbf{u}}(\mathcal{O})) \quad (3)$$

als Ausdruck für die Dynamik des Gesamtsystems.

### Stabilitätsbewertung unter Einbeziehung von Topologieänderungen

Zur Bewertung der blindleistungsbezogenen Stabilität des Gesamtsystems führt [5] den Normausdruck

$$\|(1 - \lambda)\mathbf{E} + \lambda\mathbf{B}\mathbf{L}(\mathcal{O})\|_2 = 1, \quad \lambda > 0 \quad (4)$$

ein, mit  $\mathbf{B}$  als Diagonalmatrix der zulässigen  $Q(U)$ -Kennlinienanstiege  $\beta$ . Für eine Anwendung auf die (N-1)-Netzsicherheitsbewertung werden nachfolgend praxisnahe Annahmen getroffen: a) Die Filterkonstante  $\lambda$  aus (1) wird aufgrund technisch-normativer Vorgaben für alle DEAs auf einen Wert  $\lambda_{\text{fix}}$  fixiert. b) Anstatt des multivariablen kontinuierlichen Betriebsfallraumes wird eine konkrete Auswahl an kritischen (N-1)-Netztopologien  $\mathcal{T}_{\text{krit}}$  sowie charakteristischer Betriebszustände  $\mathcal{K}_{\text{krit}}$  genutzt. Es ergibt sich die Anzahl  $Z_{\text{sel}} = |\mathcal{K}_{\text{krit}}| \cdot |\mathcal{T}_{\text{krit}}|$  zu untersuchender Netzzustände. Für die Bestimmung der maximal zulässigen einheitlichen  $Q(U)$ -Kennlinienanstiege  $\beta_{\text{max}}(\kappa, \tau)$  können somit aus (4) die Optimierungsprobleme

$$\begin{aligned} \min & \quad 1/\beta_{\text{max}} \\ \text{u. d. B. d.} & \quad \beta_{\text{max}} > 0 \\ & \quad \|(1 - \lambda_{\text{fix}})\mathbf{E} + \lambda_{\text{fix}}\mathbf{B}(\beta_{\text{max}})\mathbf{L}(\kappa, \tau)\| < 1 \\ & \quad \mathbf{L}(\kappa, \tau) + \mathbf{L}(\kappa, \tau)^T \text{ positiv definit} \end{aligned} \quad (5)$$

abgeleitet werden, für alle  $\kappa$  aus  $\mathcal{K}_{\text{krit}}$  und  $\tau$  aus  $\mathcal{T}_{\text{krit}}$ .

Mit Hilfe dieses Ansatzes kann eine Bewertung von Maßnahmen zum Blindleistungsmanagement im Rahmen der Netzsicherheitsbewertung hinsichtlich des  $Q(U)$ -Kennlinienanstiegs  $\beta$  und der Anlagendynamik  $\lambda$  erfolgen. Die Anwendung des Verfahrens befähigt den Netzbetreiber zudem den Einfluss einer Topologieänderung auf die Verkopplung von  $Q(U)$ -geregelten DEAs zu bewerten und kritische Netzzustände analytisch sichtbar zu machen [5].

- [1] K. Morison, L. Wang und P. Kundur. „Power system security assessment“. IEEE Power and Energy Magazine 2.5 (2004), S. 30–39. DOI: 10.1109/MPAE.2004.1338120.
- [2] M. L. Lima, R. V. Pombo, J. A. P. Filho und O. F. Ávila. „Impact of ancillary services in the steady-state security region in distribution systems“. 2022 IEEE International Conference on Automation/XXV Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA). 2022. DOI: 10.1109/ICA-ACCA56767.2022.10005976.
- [3] A. Eggli, S. Karagiannopoulos, S. Bolognani und G. Hug. „Stability Analysis and Design of Local Control Schemes in Active Distribution Grids“. IEEE Trans. Power Syst. 36.3 (2021), S. 1900–1909. DOI: 10.1109/TPWRS.2020.3026448.
- [4] J. Schmitt, S. Ecklebe und S. Krahmer. „An extended stability criterion for grids with Q(V)-controlled distributed energy resources“. IEEE Power and Energy Student Summit (PESS 2023).
- [5] S. Krahmer, S. Ecklebe, P. Schegner und K. Röbenack. „Zur Notwendigkeit von Stabilitätsbetrachtungen von Umrichterinteraktionen bei der Sicherheitsbewertung in Verteilnetzen“. at – Automatisierungstechnik 2023(12). DOI: 10.1515/auto-2023-0142

## Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Power Quality“



Ana Maria Blanco, Dr.-Ing.

### Impact of modelling downstream HV networks on harmonic impedance in transmission systems



The increasing prevalence of power electronic-based devices and installations within transmission systems, such as Windparks, PV-parks, FACTS, HVDC, etc., has increased interest among transmission network operators in accurately measuring and simulating waveform distortion, particularly harmonics. Harmonic simulation is complex, and requires detailed modeling of all system components, accounting for positive, negative, and zero sequence impedances, and their frequency-dependent variations.

In order to investigate the propagation and superposition of harmonics within transmission systems, a dedicated network model for harmonic studies has been conceived and implemented in DigSilent Power Factory. Figure 1 illustrates the network, segmented into three regions and operating at three voltage levels (380 kV, 220 kV and 110 kV). This network consists of 79 nodes, 48 overhead lines, 16 generators and 34 loads. The loads correspond to the downstream HV networks connected via transformers to the 380 kV and 220 kV nodes. Detailed modeling and parameterization of transmission lines, transformers, synchronous generators, generation connected by power electronic interfaces (MMC) and compensation devices were under taken to ensure an accurate harmonic analysis. Nevertheless, modeling

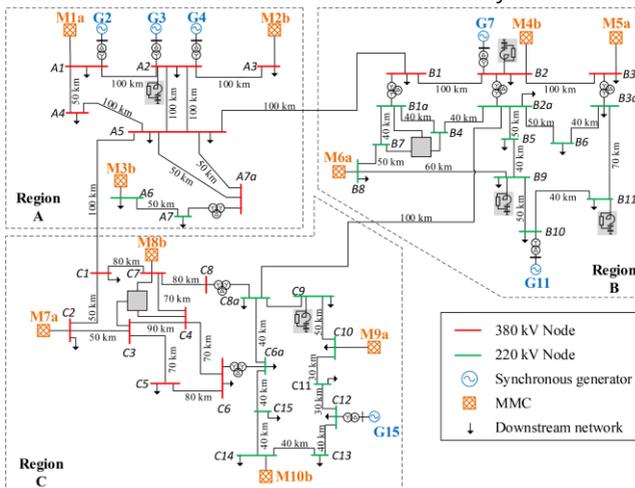


Figure 1: Network model for harmonic studies in transmission systems

the downstream networks posed challenges due to limited available information, mainly restricted to active and reactive power consumption.

One facet examined within the test network was the impact of modelling the 110 kV networks on the frequency dependent network impedance (FDNI) and consequently on the results of the harmonic power flow. Initially, three models depicted in Figure 2 were evaluated. The first model mirrors the typical load representation for harmonic analysis found in most software applications. The second model, similar to the first, organizes its elements in parallel. Lastly, the third model extends the second model by incorporating cable capacitances within the HV networks into the model. The parameters R and L in all models are calculated based on the active and reactive consumptions of each downstream network.

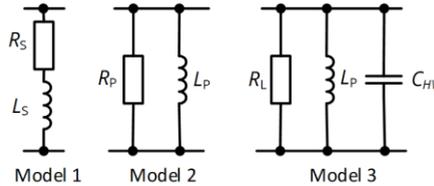


Figure 2: Load models for the representation of downstream HV networks

Figure 3 illustrates the FDNI at two nodes resulting from the application of the three load models. Clear distinctions among the three cases are observable, particularly at resonance frequencies. Certain nodes exhibit higher fluctuations in the FDNI than others. Generally, the 220 kV nodes show greater impedance variations than the 380 kV nodes, with specific areas within the network having more pronounced fluctuations, such as nodes A7 and A6 (220 kV, Region A), and nodes C10 to C15 (220 kV, Region C). Notably, the third model, featuring capacitance, seems to induce higher resonances across nearly all nodes. Consequently, the downstream network model significantly influences the transmission network's impedance and subsequently affects the harmonic load flow. Further analysis and measurements are imperative to develop an accurate model of the downstream networks.

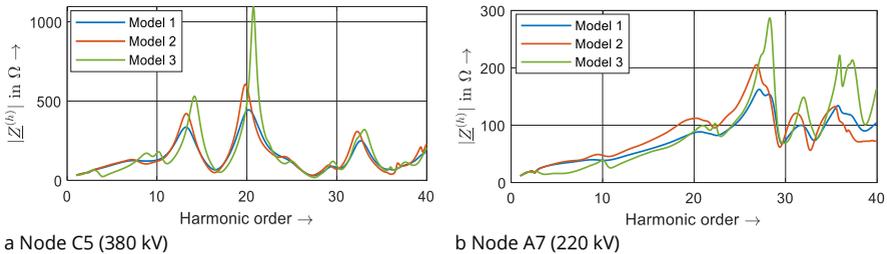


Figure 3: Frequency dependent network impedance seen at nodes C5 and A7 for the implementation of three different load models



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

**Trendanalysen auf Basis zeitlich begrenzter, jährlich wiederholter Messungen**



In den letzten Jahrzehnten wurden die Verteilungsnetze mit neuen und grundlegenden Veränderungen konfrontiert (z.B. zunehmende Anzahl moderner Leistungselektronik), von denen man erwartet, dass sie auch erhebliche Auswirkungen auf die Elektroenergiequalität haben werden. Infolgedessen setzen Netzbetreiber große Messkampagnen zur Überwachung ein, um die Beobachtbarkeit ihrer Netze, u.a. zur Erkennung von Trendentwicklungen, zu verbessern. So erfolgt in Österreich bereits seit 1995 eine Erhebung der Spannungsqualität im Mittelspannungsnetz, welche seit 2012 auch gesetzlich vorgeschrieben ist. In Mittelspannungs- (MS) und Niederspannungsnetzen (NS) ist die Anzahl der Umspannstationen extrem hoch und geeignete Kommunikationsverbindungen für die Datenfernübertragung sind oft nicht verfügbar. Für diese Spannungsebenen ist eine vollständige und dauerhafte Erfassung aller Messorte praktisch nicht realisierbar. In Österreich werden für die Bewertung der Spannungsqualität deshalb zeitlich begrenzte, jährlich wiederholte Messungen an ausgewählten Orten durchgeführt. Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurde untersucht wie zuverlässig eine Trendabschätzung auf Basis solcher „lückenden“ Messungen möglich ist. Dazu wurden dauerhafte Messungen über mehrere Jahre verwendet, welche durch einen Netzbetreiber zur Verfügung gestellt werden konnten. Die Ergebnisse wurden auf der CIRED-Konferenz 2023 veröffentlicht [1].

### **Kontinuierliche Messungen**

Die Analyse von Trendentwicklungen basiert in der Regel auf permanenten Messungen über mehrere Jahre. Beispielhaft sind die wochenweise berechneten 95%-Quantile der 10-min-Mittelwerte für die 5. Spannungsharmonische wie in Bild 1 (graue Linie) dargestellt. Die Prozentwerte beziehen sich auf den in EN 50160 festgelegten Grenzwert von 6 % (harmonischer Pegel relativ zur Grundschwingung) und entsprechen der Ausnutzung dieses Grenzwertes. Für die Zeitreihe ist gut zu erkennen, dass neben saisonalen Unterschieden mit höheren Pegeln in den Sommermonaten auch eine leicht steigende Trendkomponente existiert. Mit Verfahren der Zeitreihenzerlegung wie dem STL-Verfahren lassen sich solche Trendkomponenten extrahieren [1]. Anhand dieser Trendkomponente, welche als Referenztrendentwicklung (farbige durchgezogene Linien) verwendet wird, ist die leicht steigende Tendenz von ca. 35 % auf 45 % Ausnutzung des Grenzwertes gut zu sehen.

### **Lückende Messungen**

Lückende Messungen sind zeitlich begrenzte Messungen (z.B. wenige Wochen), welche regelmäßig (z.B. jährlich) wiederholt werden. Für das Beispiel in Bild 1 werden jährlich Messungen für 3 Wochen jeweils in der 1. Kalenderwoche eines Jahres beginnend wiederholt (schwarze Punkte). Um für solche lückende Messungen auch Trendentwicklungen abschätzen zu können, wurden die jährlichen Trendanstiege zwischen zwei aufeinanderfolgenden

Messungen mit Hilfe von linearen Regressionen bestimmt. Für das Beispiel in Bild 1 mit einer Messdauer von sechs Jahren ergeben sich fünf Trendgeraden (farbig gestrichelte Linien) für die der jährliche Trendanstieg bestimmt werden kann.

**Vergleich der Trendanstiege**

Die jährlichen Trendanstiege auf Basis kontinuierlicher Messungen ( $G_{con}$ ) wurden innerhalb der gleichen Intervalle wie die jährlichen Trendanstiege auf Basis lückender Messungen ( $G_{gap}$ ) berechnet. Anhand der absoluten Differenz  $\Delta G$  zwischen beiden Trendanstiegen wurden die Unterschiede zwischen beiden Varianten quantifiziert. Für das Beispiel aus Bild 1 fallen die Unterschiede gering aus und betragen im Mittel 1,2 % (vgl. Tabelle 1).

Der Vergleich der Trendanstiege erfolgte für insgesamt 64 Messorte in Mittelspannungsnetzen aus Gesamtösterreich und 27 verschiedene Spannungsqualitätskenngößen (u.a. Verzerrung und Flicker). Hierbei wurden die Trendanstiege für mehr als 1000 verschiedene Zeitreihen mit allen unterschiedlichen Messbeginn innerhalb eines Jahres berechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Trendbewertung auf der Grundlage lückender Messungen vergleichbare Trendanstiege wie für kontinuierliche Messungen ergeben [1]. Nur in sehr wenigen Fällen treten größere Unterschiede auf, welche auf einzelne Messwochen mit ungewöhnlich hohen/niedrigen Werten innerhalb der zeitlich begrenzten Messungen zurückzuführen sind.

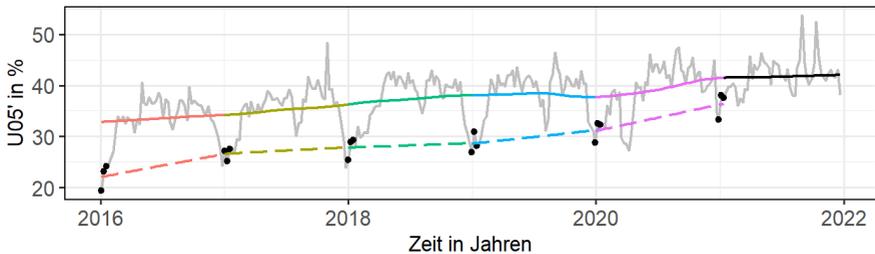


Bild 1: Ausnutzung des Grenzwertes für die 5. Spannungsharmonische (*grau*) auf Basis der wöchentlichen 95%-Quantile; Vergleich der jährlichen Trendanstiege basierend auf kontinuierlichen Messungen (*farbige durchgezogene Linien*) und lückenden Messungen (*farbige gestrichelte Linien*); Messbeginn: 1. Kalenderwoche pro Jahr; Referenztrendentwicklung (*schwarze Linie*)

Tabelle 1: Absolute Differenz  $\Delta G$  zwischen den jährlichen Trendanstiegen basierend auf kontinuierlichen Messungen ( $G_{con}$ ) und lückenden Messungen ( $G_{gap}$ ) für das Beispiel aus Bild 1

Jahr	2016	2017	2018	2019	2020
$G_{gap}$ in %	4,6	1,3	0,9	2,7	5,4
$G_{con}$ in %	1,4	2,2	1,8	-0,3	3,8
$\Delta G$ in %	3,2	-0,9	-0,9	3,0	1,6

[1] M. Domagk, J. Meyer, K. Scheida, R. Braunstein, E. Traxler, und R. Zoll, „Impact of Discontinuous Measurements on the Trend Analysis of Power Quality Parameters“, in 27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023), Rom, Italien, Juni 2023. doi: 10.1049/icp.2023.1082.



**Etienne Gasch, Dipl.-Ing.**

### **Einfluss der Messortanzahl auf die statistische Unsicherheit bei der Bestimmung der Spannungsqualität**

Die Überwachung der Spannungsqualität erfordert, dass theoretisch an allen Verknüpfungspunkten im Netz gemessen werden sollte. Dazu muss an allen diesen Verknüpfungspunkten eine entsprechende Messeinrichtung installiert sein. Dies umfasst ein Messgerät sowie in höheren Spannungsebenen Wandler mit entsprechender Genauigkeit im gesamten betrachteten Frequenzbereich. Die damit gesammelten Messdaten müssen anschließend übertragen oder ausgelesen, zentral gespeichert und schließlich ausgewertet werden. Dies erfordert einen hohen materiellen und personellen Aufwand, der in einem sinnvollen Verhältnis zu den daraus gewonnenen Erkenntnissen hinsichtlich der Spannungsqualität im Netz stehen muss. Die Spannungsqualität des Netzes für eine Qualitätskenngröße wird üblicherweise durch das 95%-Quantil über alle 95%-Quantile der wöchentlichen 10-Minuten Werte dieser Qualitätskenngröße gebildet.

Ziel dieser Analyse ist die Bestimmung der Anzahl an Messorten, die für eine Aussage zur Spannungsqualität des gesamten Verteilungsnetzes unter Berücksichtigung einer vorgegebenen Unsicherheit notwendig ist. Da es keinen Datensatz der realen Messungen mit Messdaten aller potentiellen Messorte gab, werden für diese Analyse die für  $x$  Messorte vorliegenden Messdaten auf die für das Gesamtnetz vorgegebenen 5000 Messorte erweitert. Dies geschieht mittels des Verfahrens der Kerndichteschätzung. Dabei wird eine empirische, kontinuierliche Verteilungsdichtefunktion der Wochenquantile jeder Messgröße bestimmt. Auf Basis der Verteilungsfunktion werden die Wochenquantile für alle Messorte generiert. Aus dieser so erstellten Grundgesamtheit wird mittels Monte-Carlo-Simulation mehrfach (z. B. 20.000 Mal) eine feste Anzahl an Messorten gezogen (z. B. 50 Messorte). Für jede Wiederholung wird das 95%-Quantil je Qualitätskenngröße gebildet. Bei 20.000 Wiederholungen erhält man entsprechend 20.000 dieser Werte. Aus der Verteilung dieser Werte wird die Differenz des 5%- und 95%-Quantils ( $R_{90}$ ) ausgewertet. Die Vorgehensweise wird für verschiedene Anzahlen an Messorten (100, 200, 300, ...) durchgeführt.

In Bild 1 sind die Ergebnisse von 40 Monte Carlo Simulationen für den THD dargestellt. Die Simulationen erfolgten für 20 bis 800 Messorte mit einer Schrittweite von 20 Messorten. Dargestellt sind die Ergebnisse aller Wiederholungen (graue Punkte). Min- und Maxwert werden als schwarze Box, das 5%- und das 95%-Quantil als blaue Linien, sowie der Median als rote Linie dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich im Bereich ab etwa 300 Messorten nur noch geringe Änderungen von  $R_{90}$  ergeben (Bild 2), ab etwa 500 sind selbst bei den Min und Maxwerten kaum noch Änderungen zu sehen. Dies bedeutet, dass für die Betrachtung des THD 500 Messorte von den 5000 Messorten der Grundgesamtheit ausreichen, wenn man diese Messung jedes Jahr am selben Ort durchführt. Bei rotierenden Messungen, wenn jedes Jahr an anderen Messorten gemessen wird, bis alle Messorte einmal gemessen wurden, sind 300 Messorte für die Betrachtung des THD ausreichend.

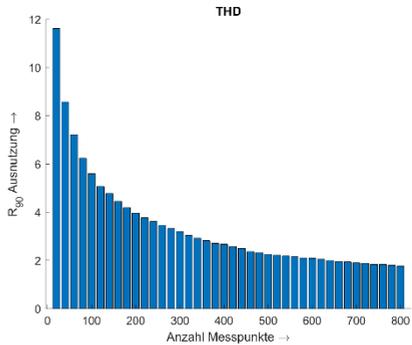
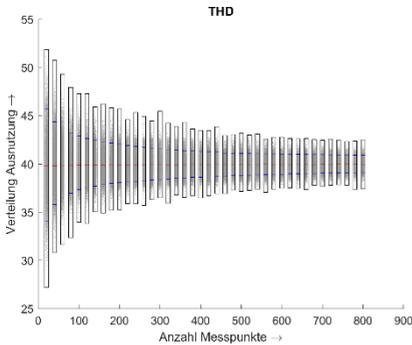


Bild 1: Verteilung der Ausnutzung der 95%-Quantile aller Wochenquantile des THD in Abhängigkeit von der Anzahl der gezogenen Messpunkt mit einer Box (schwarz um die Extremwerte), dem  $R_{90}$  (blau) und dem Median (rot)

Bild 2:  $R_{90}$  des THD für 20 bis 800 Messorte

In Tabelle 1 sind die Werte für  $R_{90}$  für alle untersuchten Qualitätskenngrößen bei 400 Messorten gelistet. Die größten Werte für  $R_{90}$  haben der Spannungseffektivwert und die 5. Spannungsharmonische. Alle anderen Kenngrößen, insbesondere die höheren Harmonischen haben sehr kleine Werte für  $R_{90}$ . Dies bedeutet, dass bei einem gemessenen Netzquantil der wahre Wert bspw. für den THD um +/- 2,8 Prozentpunkten abweichen kann. Beim Spannungseffektivwert kann die Abweichung bis zu 4 Prozentpunkte betragen.

Tabelle 1:  $R_{90}$  für 400 Messorte

<b>Kenngröße</b>	<b><math>R_{90}</math> bei 400 Messorten</b>
Spannungseffektivwert	4,0
THD	2,8
Langzeitflicker	3,0
5. Harmonische	3,5
7. Harmonische	1,4
11. Harmonische	1,0



Victor Khokhlov, M. Sc.

### Impedance Characteristics at Socket Outlets in Residential and Commercial Buildings in the Frequency Range 2-150 kHz



The frequency-dependent network impedance (FDNI) links distorted voltages and currents and is a crucial prerequisite for several applications, including compliance testing of electrical appliances in the laboratory. In that case, the FDNI of low voltage (LV) networks in the frequency range of 2-150 kHz is typically represented by reference impedance characteristics [1], [2]. Although these characteristics are essential to maintaining a credible regulatory regime, they are based on studies that date back several decades. As public LV networks continue to evolve, the validity of reference impedances for representing the FDNI becomes uncertain. This raises concerns about the applicability of reference impedances, particularly at points in LV networks where modern power electronic appliances are most commonly found, such as at house terminals and socket outlets. The study [3] aimed to determine the validity of reference impedances for representing the FDNI in current public LV networks based on in situ measurements.

Table 1: Overview of the measurement sites (socket outlets)

	GE	ES	UK
Residential buildings	11 (124)	2 (7)	2 (2)
Commercial building	1 (4)	1 (4)	1 (4)

The measurement campaign was conducted in residential and commercial buildings in Germany, Spain, and the United Kingdom. Table 1 provides an overview of the measurement sites, distinguishing between residential and commercial buildings. The majority of the buildings are located in urban areas, but suburban and rural LV networks were also considered. The residential buildings include single- and multi-family houses, with the selection of measurement sites in the latter case being limited to one apartment. The commercial buildings include offices and research laboratories.

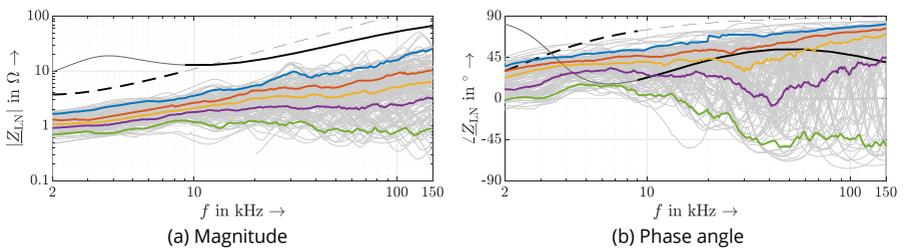


Figure 1: Results of impedance measurements (grey) including percentile curves and reference impedances (– LISN, – – AMN, 95<sup>th</sup>, 75<sup>th</sup>, 50<sup>th</sup>, 25<sup>th</sup>, 5<sup>th</sup> percentiles)

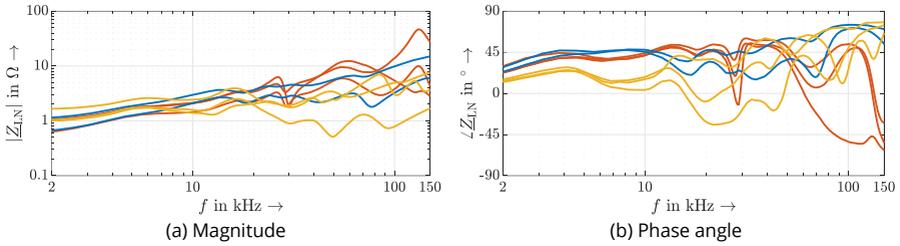


Figure 2: Results of impedances measurements at socket outlets in different rooms of the same building (red: kitchen (phase A), blue: bedroom (phase B), yellow: living room (phase C))

Figure 1 presents an overview of individual impedance measurements at the measurement sites listed in Table 1. For better comparability, the representation is complemented with the selected percentile curves and characteristics of the reference impedances, namely AMN (2-9 kHz) [1] and LISN (9-150 kHz) [2].

Despite substantial variation in the FDNI magnitude, a rather conservative character of reference impedances is observed. In half of the cases, the measured FDNI magnitudes account for approximately 10-30 % of reference impedance magnitudes. The wide spread of measurement results also applies to the FDNI angles. In contrast to the characteristics of the reference impedances, the results show a clear capacitive behavior of the FDNI, especially at frequencies above 10 kHz.

Figure 2 illustrates the results of impedance measurements taken at various socket outlets within an apartment in a multi-family house. The data reveals a significant variation in the FDNI magnitude, as well as a high degree of diversity between socket outlets within the same room. To some extent, the diversity of the FDNI magnitude can be attributed to the allocation of the socket outlets to different phases. Based on the knowledge of the layout of the electrical installation, the maximum difference in the FDNI magnitudes between different phases is estimated at a factor of 15. Alternatively, a maximum difference in the FDNI magnitude between all socket outlets in the apartment reaches a factor of 50.

The potential implications of these findings on emission limits derived from reference impedances should be discussed among relevant stakeholders in IEC working groups. Future research should include measurements from other regions of the world and a closer examination of the nonlinear behavior of the FDNI within the power cycle.

- [1] Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto, IEC Standard 61000-4-7:2002+AMD1:2008, 2002.
- [2] Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-2: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Coupling devices for conducted disturbance measurements, CISPR Standard 16-1-2+AMD1, 2017.
- [3] V. Khokhlov, R. Stiegler, J. Meyer, S. Lodetti, P. Davis, P. Wright, I. Fernández, J. González-Ramos, A. Gallarreta, D. de la Vega, "Impedance Characteristics at Socket Outlets in Residential and Commercial Buildings in the Frequency Range 2-150 kHz," in Proc. 27th International Conference on Electricity Distribution., 2023.



**Sascha Müller, Dipl.-Ing.**

### **Simulation des Einflusses einer Schnellladeinfrastruktur auf die Oberschwingungspegel**

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Schnellladesäulen stellen leistungselektronische Lasten hoher Leistung dar, welche eine Verzerrung des Netzstromes durch Oberschwingungen verursachen. Messungen haben gezeigt, dass die Höhe der Oberschwingungsemission nicht nur von der vorhandenen Verzerrung der Spannung am Anschlusspunkt, sondern auch vom Arbeitspunkt der Ladesäule, also der tatsächlich benötigten Ladeleistung, abhängig ist. Die derzeit verfügbaren Elektrofahrzeuge nutzen jedoch meist die zur Verfügung stehende Leistung nicht komplett aus. Zudem verfügt eine Ladeinfrastruktur zumeist über mehrere Ladesäulen, welche im realen Betrieb häufig nicht alle gleichzeitig verwendet werden. Eine Bewertung der Oberschwingungsemission bei einer hohen Ausnutzung der Ladeinfrastruktur ist daher auf Basis von Messungen nur schwer möglich. Eine Abschätzung kann aber eine geeignete Simulation liefern, sofern die Emissionscharakteristik der Schnellladesäulen sowie ihre Impedanzen und die der anderen Netzkomponenten ausreichend genau in entsprechenden Modellen abgebildet werden. Die Ergebnisse einer solchen Simulation sollen anhand einer realen Schnellladeinfrastruktur, welche neben drei Schnellladesäulen auch über einen Batteriespeicher verfügt, dargestellt werden. Die schematische Struktur des Netzes mit den relevanten Komponenten ist Bild 1 zu entnehmen [1], [2].

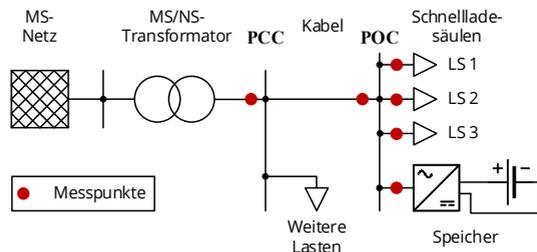


Bild 1: Schematische Struktur des Netzes

Die Modellierung der Schnellladesäulen und des Batteriespeichers erfolgt auf Basis von durchgeführten Messungen und umfasst jeweils die Emissions- und die Impedanzcharakteristik. Zudem werden die am Netz angeschlossenen Haushaltskunden in aggregierter Form modelliert. Um das so entstandene Simulationsnetz zu validieren bzw. zu optimieren, wurden zunächst zwei Szenarien, d.h. Ausnutzungsgrade der Ladeinfrastruktur, welche auch im Feld gemessen wurden, simuliert. Der Vergleich zwischen Simulation und Messung zeigte eine besonders gute Übereinstimmung für die 7. Harmonische, welche zugleich auch die

bei Weitem höchsten Pegel für Strom und Spannung aufweist. Aus diesem Grund liegt im Folgenden der Fokus auf der 7. Harmonischen.

Es werden insgesamt elf zusätzliche Szenarien simuliert, welche sich in der Anzahl der verwendeten Schnelllader sowie dem Ausnutzungsgrad der Schnellladeinfrastruktur unterscheiden. In Bild 2 werden die Pegel der 7. Stromharmonischen in der Zuleitung, der Beitrag zur 7. Spannungsharmonischen am Netzverknüpfungspunkt (PCC) sowie der absolute Pegel der 7. Spannungsharmonischen an der Übergabestelle, welche identisch zum Anschlusspunkt (POC) ist, dargestellt. Zusätzlich sind in Bild 2 (a) und (b) die jeweiligen Grenzwerte gemäß der VDE-Anwendungsregel AR-N 4100 und in Bild 2 (c) der Grenzwert nach der EN 50160 eingezeichnet.

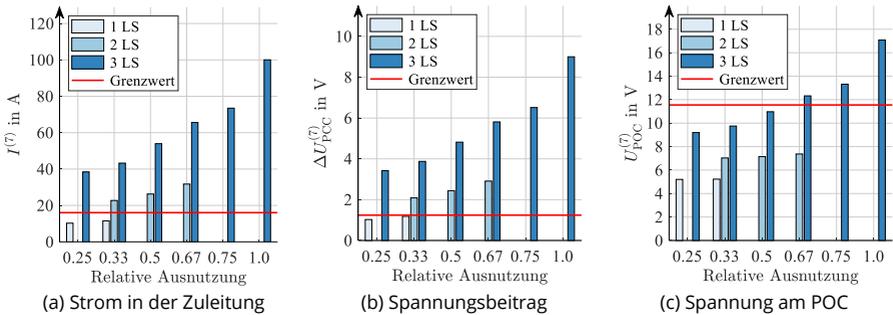


Bild 2: Einfluss einer zunehmenden Ausnutzung der Schnellladeinfrastruktur auf die 7. Strom- und Spannungsharmonische

Es ist klar zu erkennen, dass die emittierte 7. Stromharmonische den zulässigen Grenzwert überschreitet, sobald mehr als eine Schnellladesäule in Betrieb ist. Ähnliches gilt für den Beitrag zum Pegel der 7. Spannungsharmonischen am Verknüpfungspunkt. Sofern alle drei Schnelllader aktiv sind, muss damit gerechnet werden, dass sowohl der Strom als auch der Spannungsbeitrag über dem doppelten Grenzwert liegen. Im ungünstigsten Fall, d.h. bei einer Ausnutzung von 100 % der installierten Leistung der Ladeinfrastruktur, wird für beide Größen ungefähr das Fünffache des entsprechenden Grenzwerts erwartet. Beim gleichzeitigen Betrieb aller drei Schnelllader wird selbst der Grenzwert nach der EN 50160 für die 7. Spannungsharmonische an der Übergabestelle entweder nahezu erreicht oder bei sehr hohen Ausnutzungen (ab ca. 67 %) sogar überschritten. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bei einer hohen Ausnutzung der Ladeinfrastruktur mit einer starken Verzerrung der Spannung zu rechnen ist. Um dies zu vermeiden, sind Abhilfemaßnahmen, wie z.B. der Einsatz eines Filters, erforderlich.

[1] S. Müller, J. Meyer, J. Jacob, P. Giertz, "Harmonic and Supraharmonic Disturbances Caused by the Combined Operation of Fast Charging Stations and a Battery Storage," CIRED Workshop on E-mobility and power distribution systems, IET, pp. 1024-1028, 2022.

[2] S. Müller, J. Meyer, J. Jacob, "Modeling and Simulation of the Impact of a Fast Charging Infrastructure on Harmonic Disturbance Levels," 27<sup>th</sup> Int. Conf. on Electricity Distribution (CIRED), IET, pp. 2918-2922, 2023.



**Morteza Pourarab, M. Sc.**

**Reproducibility of network impedance measurements using single-frequency and broadband signal injection**

Supported by:



Characterization of frequency-dependent network impedance (FDNI) plays a crucial role in power quality studies. It is essential for calculating emission limits for new customer installations and understanding harmonic propagation mechanisms. Additionally, FDNI is vital for assessing harmonic resonance and analysing the stability of grid-tied inverter-based resources. Furthermore, FDNI in networks with increased penetration of nonlinear devices is a specific concern. These devices introduce harmonic and interharmonic frequencies that can interfere with the excitation signal frequencies. These frequency couplings are reflected in sub-cycle impedance variations. While average FDNI is obtained over multiple power cycles, sub-cycle impedance is based on short time windows within a single power cycle.

Various techniques exist for measuring FDNI, categorized as non-invasive and invasive methods. Non-invasive methods observe natural voltage and current variations at the point of interest. Invasive methods are favoured for accuracy, offering controllability over excitation, improving the signal-to-noise ratio (SNR), and ensuring repeatability of measurements. Invasive methods can use sinusoidal or broadband signals. Sinusoidal signals include single frequency, discrete multiple frequency, or chirp signals. Broadband methods, like impulse and pseudo-random sequences, perturb the network simultaneously with a broad spectrum of frequencies, reducing measurement time. This is not possible with single frequency method, which require repetition for the entire frequency band. Broadband methods using pseudo-random binary sequences (PRBS) have a tuneable frequency spectrum, ease of generation, and periodicity.

The basic approach for invasive measurement of FDNI involves a two-step difference method in which the voltage and current waveforms at the node of interest are recorded before and during network perturbation. The measured data is then transformed to the frequency domain, and FDNI is calculated as

$$Z_f = \frac{V_f}{I_{post\ f} - I_{pre\ f}} \quad (1)$$

assuming the network remains stationary during the measurement.

This study aims to determine whether FDNI derived from the commonly used broadband methods i.e. passive PRBS and pseudo-random impulse sequences (PRIS), is comparable to that obtained through the single-frequency approach [1]. In passive PRBS excitation, a power electronic switch controlled by a PRBS gate signal pulses a resistor to perturb the grid without the need for an external DC supply. PRIS is an example of an active perturbation technique, using a DC voltage source connected through a full bridge and an RLC circuit. PRIS initiates impulse waveforms at state transitions of the PRBS.

The network as shown in Figure 1 is simulated in MATLAB Simulink employing three perturbation methods: passive PRBS, PRIS, and single-frequency. Performance is assessed for average and sub-cycle FDNI. Figure 2 shows magnitude and phase responses of average FDNI. The responses are primarily inductive up to 15 kHz, where a partially damped parallel resonance occurs. They exhibit a second parallel-series resonant pair at approximately 36 kHz and 43 kHz. The responses from broadband signals show some variations, mainly attributed to the influence of nonlinear devices.

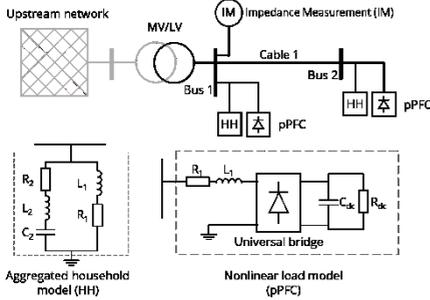


Figure 1: Schematic diagram of the network used in the simulation model

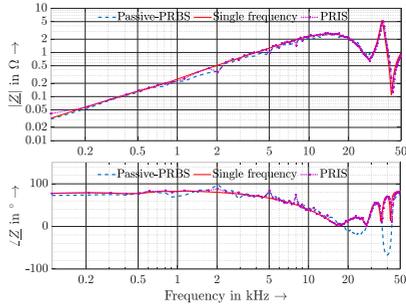


Figure 2: Impedance frequency responses obtained using passive-PRBS, single-frequency and PRIS methods

Figure 3 illustrates sub-cycle impedance at Bus 1 using the three measurement techniques, demonstrating time variability of impedance magnitude within a fundamental cycle. When diode rectifiers of non-linear devices conduct at approximately 90° and 270° (state 2), the impedance is lower compared to around 0° and 180° (state 1). In state 2, the rectifier's impedance including the DC-link capacitor is connected in parallel to the network, resulting in lower FDNI. Passive-PRBS shows slight disparities at the zero crossings of the fundamental cycle compared to PRIS and single-frequency methods due to the absence of perturbation. Further research will involve evaluation of these methods in a more realistic network, considering external factors such as background distortion and power frequency variations.

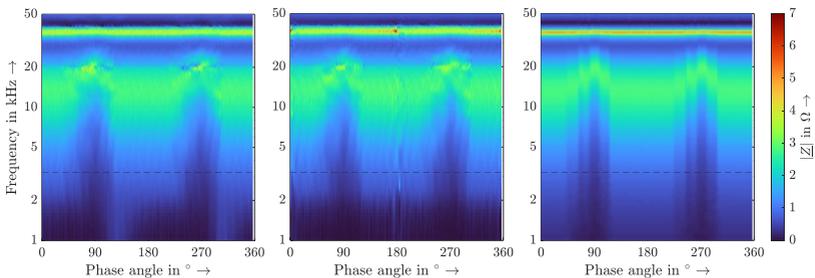


Figure 3: Sub-cycle impedance obtained using a PRIS excitation (left) passive-PRBS excitation (center) and single-frequency measurement signal injection (right).

[1] F.M. Mwaniki, M. Pourarab, R. Stiegler, J. Meyer, D. Roggo and B. Evequoz, "Reproducibility of network impedance measurements using single-frequency and broadband signal injection," IEEE 13<sup>th</sup> International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), Bern, Switzerland, 2023.



Robert Stiegler, Dipl.-Ing.

## Bestimmung des Transferkoeffizienten von Harmonischen zwischen dem Übertragungs- und Verteilungsnetz



Realistische Emissionsgrenzwerte für Kundenanlagen sind eine entscheidende Voraussetzung für den zuverlässigen Betrieb öffentlicher Verteilungs- und Übertragungsnetze sowie eine effiziente Nutzung der vorhandenen Aufnahmekapazität für Oberschwingungsemissionen. Zur Beherrschung der Oberschwingungspegel in einem Stromnetz wird der Verträglichkeitspegel auf alle Spannungsebenen aufgeteilt. Der Anteil einer Spannungsebene wird aus dem Planungspegel der betreffenden Spannungsebene und dem Eintrag aus der überlagerten Spannungsebene (Abwärtstransfer) bestimmt. Der Abwärtstransfer wird durch den Transferkoeffizienten charakterisiert und aufgrund mangelnder Kenntnisse in der Regel mit dem Wert 1 angenommen (keine Dämpfung oder Verstärkung).

Um den Transferkoeffizient in realen Netzen bestimmen zu können wurden an zwei Standorten der Amprion GmbH Messungen an jeweils einem 380 kV / 110 kV Netzkuppletransformator mit 300 MVA Bemessungsleistung durchgeführt [1]. Zur Messung des Transferkoeffizienten wird auf der 380-kV-Seite eine dezidierte Quelle von Stromharmonischen benötigt, deren Einfluss auf die Spannung sich von den vorhandenen Harmonischen im Netz signifikant abhebt. Zur Anregung des Netzes wird der Inrush-Strom eines zweiten baugleichen Netzkuppletransformators genutzt (Bild 1). Die Spannungen auf beiden Seiten des zu untersuchenden Transformators sowie die Ströme des anregenden Transformators werden mit mehreren GPS-synchronisierten Transientenrekordern mit einer Abtastrate von 500 kS/s aufgezeichnet. Da herkömmliche induktive Spannungswandler aufgrund von Resonanzen den auswertbaren Frequenzbereich begrenzen, werden die kapazitiven Durchführungen des untersuchten Transformators als Spannungssensoren verwendet. Eine Transformatordurchführung kann als kapazitiver Teiler mit einer sehr guten Linearität in einem großen Frequenzbereich betrachtet werden, jedoch ist das tatsächliche Teilverhältnis nicht genau bekannt [2] und variiert mit der Temperatur. Daher werden die Spannungen zusätzlich mit induktiven Spannungswandlern gemessen um über die Höhe der Grundschwingung die Durchführungen zu kalibrieren.

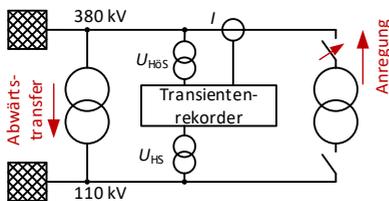


Bild 1: Prinzipskizze des Messaufbaus

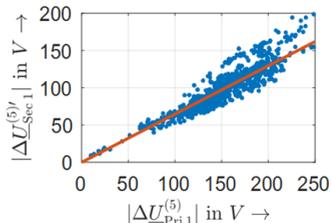


Bild 2: Beispiel der Regression für die 5. Harmonische im Mitsystem

Insgesamt wurden an jedem der beiden Messorte die Zeitverläufe von 15 Einschaltvorgängen erfasst. Die Zeitverläufe werden je Schaltereignis in ein 10-Perioden-Fenster vor der Zuschaltung und mehrere Fenster nach der Zuschaltung unterteilt. Nach der Überführung der Fenster in den Frequenzbereich und in die symmetrischen Komponenten wird das Differenzspektrum zwischen den Fenstern nach der Zuschaltung und dem Fenster vor der Zuschaltung bestimmt.

Der komplexe Transferkoeffizient ist gemäß (1) definiert. Ein Koeffizient kleiner 1 bedeutet dabei eine Dämpfung, ein Koeffizient größer 1 eine Verstärkung der jeweiligen Harmonischen  $h$  im Abwärtstransfer.

$$T_{Pri \rightarrow Sec}^{(h)} = \frac{\Delta U_{Sec}^{(h)'}}{\Delta U_{Pri}^{(h)}} \tag{1}$$

Die Bestimmung des Transferkoeffizienten aus den Differenzspektren erfolgt mittels Regressionsrechnung (Bild 2). Dabei werden alle Schaltereignisse genutzt um den Einfluss des Messrauschens zu minimieren.

Bild 3 zeigt die Beträge der bestimmten Transferkoeffizienten. Die Fehlerbalken kennzeichnen in dieser Darstellung den Vertrauensbereich der Regression. Im Mit- und Gegensystem ist bis zur 18. Harmonischen mit einem Transferkoeffizienten im Bereich von 0,3 bis 0,8 eine deutliche Dämpfung im Abwärtstransfer vorhanden. Bei höheren Harmonischen ist möglicherweise eine Verstärkung der Harmonischen vorhanden, allerdings ist der Vertrauensbereich zu groß um eine sichere Aussage zu machen. Im Abwärtstransfer des Nullsystems gibt es große Unterschiede, da hier das Erdungssystem eine große Rolle spielt. So sind z.B. am Messpunkt A mehrere Resonanzen im Transferkoeffizient sichtbar, welche bei einzelnen Harmonischen eine Verstärkung um bis zu Faktor 3 haben.

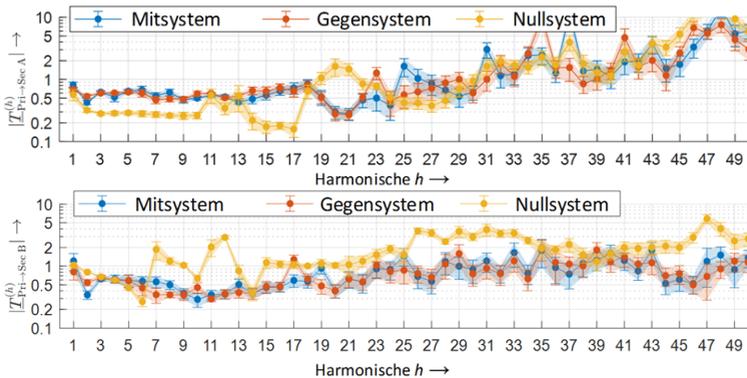


Bild 3: Transferkoeffizient an den Messorten A und B

[1] R. Stiegler, J. Meyer, R. Dommerque, M. Nazemi, D. Scherbarth, "Evaluation of Harmonic Transfer between Transmission and Distribution Network based on Measurements", *CIGRE 2023*, Rom, Italien.  
 [2] R. Stiegler, J. Meyer, J. Kilter, S. Konzelmann, 2016, "Assessment of voltage instrument transformers accuracy for harmonic measurements in transmission systems", *2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)* : IEEE, 2016 — ISBN 978-1-5090-3792-6, S. 152-157.



Olga Zybalkina, M. Eng.

### Survey of Harmonic Current and Voltage Unbalance in Transmission system

Usually, for the analysis of electric power systems the balanced situations are assumed in terms of impedances and harmonics emission. However, in reality, power systems are often unbalanced. Therefore, the balanced assumptions can lead to insufficiently accurate results. In terms of emission and disturbance levels, under unbalanced conditions harmonics do not form only one (characteristic) sequence, but do occur in all sequence components. Based on measurements of voltage and current harmonics the level of unbalance at eight different points in the German extra-high voltage system is evaluated and consequently the need to consider it in harmonic studies is emphasized. Three indices are used to evaluate the level of harmonic unbalance: Aggregated Harmonic Unbalance (AHU), Relative Magnitude Level (RML) and Prevailing Time (PT) of the sequence components.

The AHU index is calculated according to (1) using the theory of symmetrical components, i. e. positive, negative and zero sequence components. Under the balanced conditions only one of the three components is characteristic for each harmonic order: positive sequence 1<sup>st</sup>, 4<sup>th</sup>, 7<sup>th</sup>, etc.; negative sequence 2<sup>nd</sup>, 5<sup>th</sup>, 11<sup>th</sup>, etc.; and zero sequence 3<sup>rd</sup>, 6<sup>th</sup>, 9<sup>th</sup>, etc. harmonics.

$$AHU_n^{(h)} = \frac{\sqrt{(Y_{u1,n}^{(h)})^2 + (Y_{u2,n}^{(h)})^2}}{Y_{b,n}^{(h)}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

where  $Y_b^{(h)}$  is the characteristic sequence component,  $Y_{u1}^{(h)}$  and  $Y_{u2}^{(h)}$  are the two non-characteristic sequence components,  $Y$  is replaced by either current or voltage,  $h$  indicates the harmonic order and  $n = 1 \dots T$ , where  $T$  is the number of a sequence component magnitudes over a measurement period. The harmonics are measured based on a 10-min aggregation interval. To classify the unbalance level, the AHU index is divided into four ranges, i.e. low ( $AHU \leq 10\%$ ), medium ( $10\% < AHU \leq 20\%$ ), high ( $20\% < AHU \leq 30\%$ ) and very high ( $AHU > 30\%$ ) [1].

As an example, Figure 1 shows the distribution of the AHU index within four ranges for the current and voltage harmonic. In Figure 1, a trend of the increasing unbalance is observed for the current and voltage harmonics. The current harmonics demonstrate low to medium

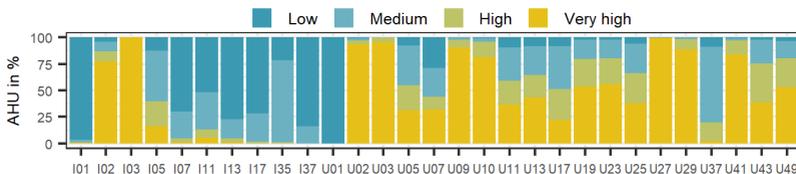


Figure 1: Distribution of AHU index among four unbalance ranges for current and voltage harmonics over eight measurement points

unbalance in higher harmonic orders compared to the highly unbalanced voltage harmonics. The odd positive sequence (e. g. 7<sup>th</sup>, 13<sup>th</sup>) and negative sequence (e. g. 5<sup>th</sup>, 11<sup>th</sup>) voltage harmonics tend to have lower unbalance compare to odd zero sequence (e. g. 3<sup>rd</sup>, 9<sup>th</sup>). The RML index evaluates the prevalence of a magnitude and is calculated as the ratio of each sequence component magnitude to the sum of all three sequence component magnitudes. The average values are presented in Table 1 for the current and voltage harmonics. For the positive and negative sequence current and voltage harmonics the characteristic component is prevailing in magnitude (RML  $\geq$  76 %). However, for the zero sequence harmonics the magnitudes of the non-characteristic sequences, i. e. neg. and pos. dominate.

Table 1: Average RML values for current and voltage harmonics for eight measurement points grouped according to characteristic component; prevailing sequence component according to RML value highlighted with sequence component color (positive in blue, negative in red and zero in green)

Characteristic component	Harmonic	RML for symmetrical component		
		Positive	Negative	Zero
Positive	Current	92 %	6 %	2 %
	Voltage	77 %	12 %	10 %
Negative	Current	13 %	86 %	1 %
	Voltage	15 %	76 %	9 %
Zero	Current	35 %	53 %	12 %
	Voltage	26 %	22 %	52 %

Due to variation in customer behavior over time, the prevalence of the sequence components can vary over time, e.g., during the day and night hours, and on different days of the week. As a result, the level of unbalance is not static but varies over time. The PT index evaluates the time during which one sequence component is higher than the other two components. Figure 2 shows the PT for the current and voltage harmonics.

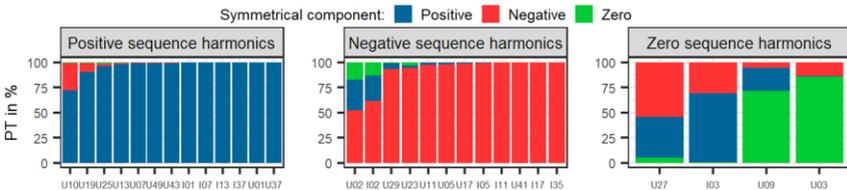


Figure 2: Distribution of PT index of symmetrical component (positive in blue, negative in red and zero in green) for current and voltage harmonics grouped according to characteristic sequence component (highlighted in grey on the top of three graphs) over 8 measurement points

For the positive and negative sequence harmonics the characteristic component is prevailing most of the time (PT > 75 %). However, for the zero sequence harmonics such as I03 and U27 the characteristic component almost does not prevail the two non-characteristic components, i. e. PR < 6 %.

The conducted survey shows a clear unbalance in some of the current and voltage harmonics. Consequently, it is strongly recommended to include harmonic unbalance in harmonic studies in order to obtain more accurate and realistic results.

[1] A. M. Blanco, J. Meyer, P. Schegner, R. Langella, and A. Testa, "Survey of harmonic current unbalance in public low voltage networks," in 2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Oct. 2016, vol. 2016-Decem, pp. 289-294, doi: 10.1109/ICHQP.2016.7783318.

## Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Schutz- und Leittechnik“



Michael Bruhns, Dipl.-Ing.

**Bewertung von Modellen für stromstarke Störlichtbögen für die Schutzauslegung in Niederspannungsanlagen**



Bei der Entwicklung und Auslegung von Schutzsystemen zur Erkennung von Störlichtbögen kommen Modelle zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens und der Bestimmung der relevanten Kenngrößen von Störlichtbögen zum Einsatz. Für die dynamische Modellierung der Kenngrößen Lichtbogenstrom und Lichtbogenleistung stehen eine Vielzahl von Lichtbogenmodellen zur Auswahl, die auf der differentiellen Beschreibung des Lichtbogenleitwertes  $g_{LB}$  beruhen [1]. Zu dieser Kategorie von Modellen zählt das mit Gl. (1) beschriebene Lichtbogenmodell nach Schwarz [2].

$$\frac{1}{g_{LB,s}} \frac{dg_{LB,s}}{dt} = \frac{1}{\tau_s \cdot g_{LB,s}^\alpha} \left( \frac{u_{LB} \cdot i_{LB}}{P_0 \cdot g_{LB,s}^\beta} - 1 \right) \quad (1)$$

### Verfahren zur Parameteridentifikation

Die Bestimmung und Validierung der Modellparameter basiert auf Messdaten, welche bei Störlichtbogenversuchen im Störlichtbogenlabor National Arc Fault Research Center (NARC) der TU Dresden aufgenommen wurden. Bei den Versuchen wurden die Lichtbogenleistung  $u_{LB}$  und der Lichtbogenstrom  $i_{LB}$  messtechnisch erfasst. Der Versuchsaufbau besteht aus zwei vertikalen, gegenüberliegenden, zylindrischen Aluminium-Elektroden. Weitere Parameter sind die Netzspannung  $U_N = 230 \text{ V}$ , die Kurzschlussleistung  $S_k'' = 4,3 \text{ MVA}$  und der zu erwartende Kurzschlussstrom  $I_k = 6,3 \text{ kA}$ . Bei den Versuchen wurde der Elektrodenabstand  $d$  variiert.

Die Messdaten wurden in eine Gruppe zur Bestimmung der Modellparameter (Gruppe 1) und eine zweite Gruppe zur Validierung der Ergebnisse (Gruppe 2) unterteilt. Anhand der Messdaten aus Gruppe 1 ( $d/\text{mm} = [10, 40, 60, 100]$ ) werden die Modellparameter mit der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt. Als Zielfunktion wird die Abweichung zwischen dem gemessenen und dem modellierten Zeitverlauf des Lichtbogenleitwertes  $g_{LB}$  verwendet. Der Parametersatz für die Elektrodenabstände aus Gruppe 2 ( $d/\text{mm} = [70, 90]$ ) wurde mittels Regression aus den zuvor ermittelten Modellparametern berechnet (s. Bild 1a).

### Bewertung von dynamischen Lichtbogenmodellen

Zunächst wurde die Plausibilität der Lichtbogenmodelle durch den optischen Vergleich der Zeitverläufe von Lichtbogenleistung  $u_{LB}$ , Lichtbogenstrom  $i_{LB}$  und Lichtbogenleitwert  $g_{LB}$  überprüft. Darüber hinaus wurde eine Validierung der Modelle auf der Grundlage der prozentualen Abweichung zwischen den mit dem Modell (*mod*) und den aus den Messdaten der Gruppe 2 berechneten (meas) Kenngrößen Lichtbogenleistung  $U_{LB}$ , Lichtbogenstrom  $I_{LB}$  und Lichtbogenleistung  $P_{LB}$  vorgenommen (vgl. Gl. (2)). Für die Elektrodenabstände

$d/mm = [70, 90]$  kann mit dem Modell nach Schwarz eine Abweichung von weniger als 5 % für alle Lichtbogenkenngrößen erreicht werden (vgl. Bild 1b,c).

$$\Delta U_{LB} = 100 \% \cdot \frac{(U_{LB,meas} - U_{LB,mod})}{U_{LB,meas}} \tag{2}$$

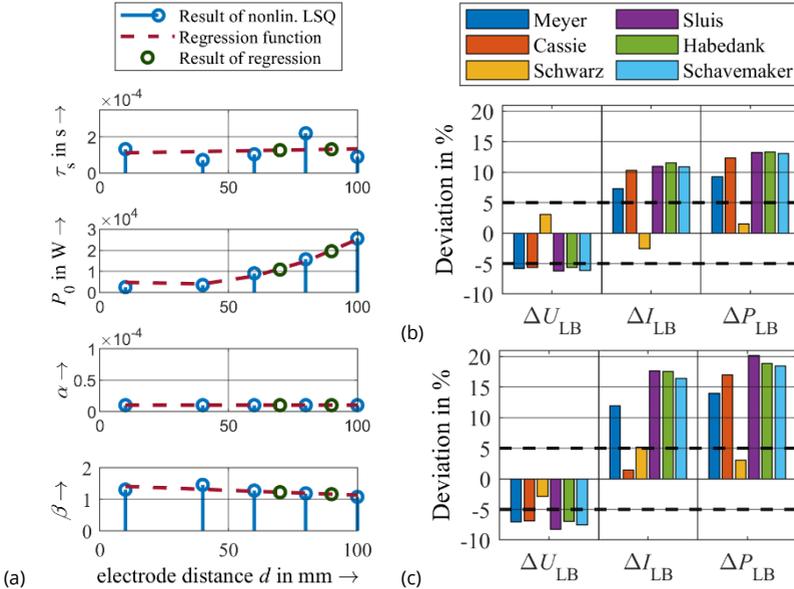


Bild 1: Ergebnisse der Identifikation der Parameter; (a) Modellparameter für das Lichtbogenmodell nach Schwarz über dem Elektrodenabstand bestimmt aus Messdaten (Gruppe 1) und durch Regression (Gruppe 2), Abweichung der aus den Messdaten und mit dem Modell bestimmten Lichtbogenkenngrößen  $\Delta U_{LB}$ ,  $\Delta I_{LB}$  und  $\Delta P_{LB}$  für (b)  $d = 70$  mm und (c)  $d = 90$  mm

Auf diese Weise können die Modellparameter eines Black-Box-Lichtbogenmodells für die Simulation von frei brennenden Hochstrom-Niederspannungs-Störlichtbögen mit hoher Genauigkeit durch die Analyse von Messdaten bestimmt und die für die Auslegung von Störlichtbogenenschutzsystemen notwendigen Lichtbogenkenngrößen berechnet werden. [3]

[1] M. Lindmayer: „Lichtbogensimulation – ein Überblick“. In 20. Albert-Keil-Kontaktseminar, VDE-Fachbericht 65, VDE Verlag GmbH, Berlin, Offenbach, 2009.

[2] J. Schwarz: „Berechnung von Schaltvorgängen mit einer zweifach modifizierten Mayr-Gleichung“. In: ETZ-A (1972), Nr. 93, S. 386-389.

[3] M. Bruhns, K. Wenzlaff, P. Schegner „Parameter Identification of electric arc models for free burning high-current fault arcs“. 23rd International Conference on Gas Discharges and their Applications (GD2023), Greifswald, 2023.



**Ricardo Herrmann, Dipl.-Ing**

## Spannungsschutz bei dezentraler Einspeisung



Die dezentrale Einspeisung durch regenerative Quellen nimmt stetig zu. Insbesondere durch neue Gesetzesbeschlüsse, wie das Berliner Solargesetz, welches vorschreibt, dass die Dachfläche von Gebäuden bei Neu- oder Umbaumaßnahmen zu mindestens 30 % mit PV zu belegen sind. Die Fehlerstatistik von Stromnetz Berlin besagt, dass im Durchschnitt ein Fehler pro Tag in der Mittelspannungsebene auftritt. Dabei sind 76 % dieser Fehler einpolige Leiter-Erde-Fehler. Die Besonderheit der Netztopologie in Berlin ist in Bild 1 dargestellt. Konventionell werden Mittelspannungsnetze (MS-Netze) in Deutschland mit einer Resonanzsternpunktterdung betrieben. In Berlin wurde aus historischen und technischen Gründen eine niederohmige Sternpunktterdung umgesetzt, welche über einen Sternpunktbildner realisiert ist (Bild 1).

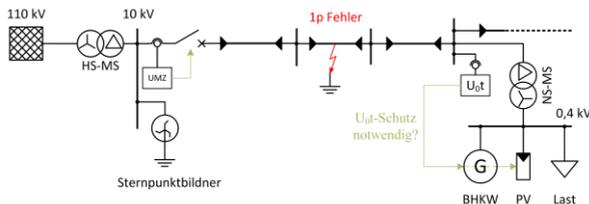


Bild 1: Typischer 10 kV-Mittelspannungs-Abgang in Berlin

Um eine Fehlerausweitung und Gefährdungen im Netz zu vermeiden, sollte der verbleibende Netzabschnitt nach einer notwendigen Schutzabschaltung schnell spannungsfrei geschaltet werden. Durch den höheren Anteil an dezentraler Einspeisung wird im Gegenzug dazu ein Leistungsgleichgewicht und die Bildung einer Netzinsel wahrscheinlicher.

Im Zuge einer Studie sollte untersucht werden, ob ein zusätzlicher Spannungsschutz erforderlich ist, welcher durch die Messung der Nullspannung ( $U_0$ ) einen MS-Fehler erkennt und die dezentralen Anlagen vom Netz trennt. Zusätzlich sollte geklärt werden, ob die in der VDE-AR-N-4105 [1] geforderte aktive Inselnetzerkennung ausreicht.

Simulative Voruntersuchungen zeigten, dass die Nullspannung ein zuverlässiges Kriterium zur Erkennung eines einpoligen Fehlers darstellt, jedoch nur in der Mittelspannung sichtbar ist. Der nachgelagerte MS-NS-Ortsnetztransformator mit der Schaltgruppe Dy überträgt das Nullsystem nicht auf die Niederspannungsseite. Damit ist eine Weitergabe des Abschaltsignals an die dezentralen Anlagen notwendig, welches je nach Gegebenheit zusätzliche Kosten verursacht.

Anhand von Laborversuchen an einem modellhaften Aufbau nach Bild 2 wurde das Verhalten verschiedener Wechselrichter untersucht. Dabei wurde die Schaltgruppe des Transformators und die Kapazitäten der MS-Kabel nachgebildet. Die Last bildeten Glühlampen und

eine Asynchronmaschine, welche über eine angeschlossene Gleichstrommaschine angetrieben oder belastet werden konnte.

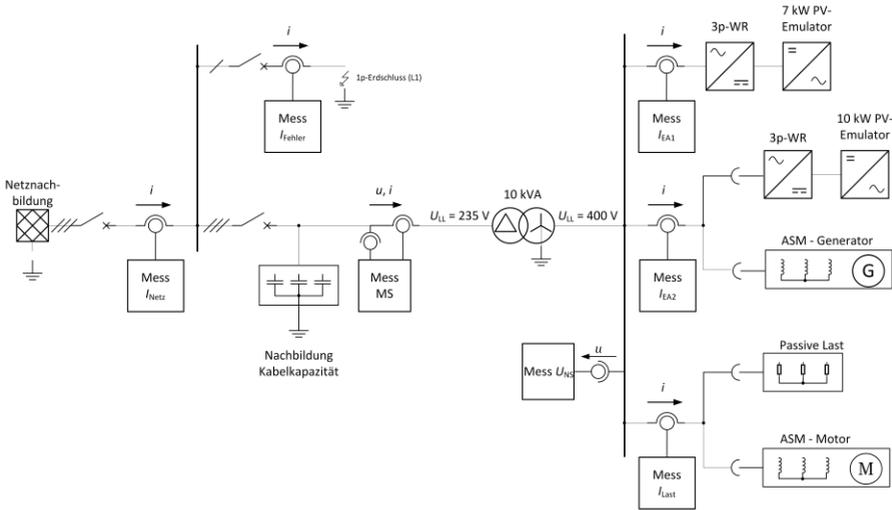


Bild 2: Versuchsaufbau zur Untersuchung des Verhaltens der Wechselrichter

In den Versuchen zeigte sich, dass sich das aktive Inselnetzverfahren auf Basis einer Frequenzverschiebung durch Blindleistungseinspeisung gegenseitig stören kann. In Bild 3 ist ersichtlich, dass während „EA1“ seine Blindleistungseinspeisung ins Negative absenkt, kompensiert „EA2“ das mit einem Anstieg ins Positive. Dennoch zeigte sich bei den Laborversuchen, dass keine Netzinsel länger als eine Sekunde bestehen blieb. Der  $U_0t$ -Schutz kann damit für alle nicht inselnetzbildenden PV-Anlagen, die eine aktive Inselnetzenerkennung nach VDE-AR-N-4105 [1] besitzen, entfallen. Es reicht aus, wenn größere generatorische Erzeugungsanlagen mit einem Netzverknüpfungspunkt in der Mittelspannung durch einen  $U_0t$ -Schutz abgeschaltet werden.

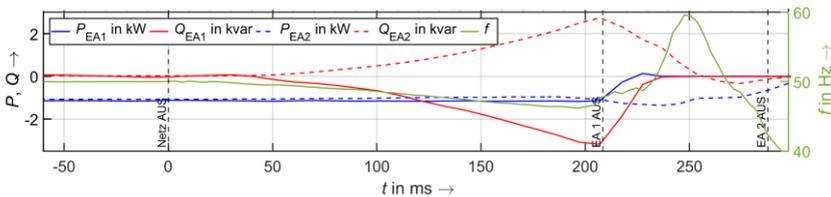


Bild 3: Verhalten der elektrischen Größen bei zwei Wechselrichtern nach der Netztrennung

[1] VDE-AR-N 4105 „Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz – Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz“, VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V, 2018.



**Carlo Liebermann, Dipl.-Ing.**

**Planung von Hochspannungsleitungen  
mit dem BIM-Ansatz im Projekt  
„EnergyBIM“**

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Mit dem Ziel die Emission der Treibhausgase zu senken, wird zukünftig vermehrt auf erneuerbare (CO<sub>2</sub> – arme) Energieerzeugung gesetzt. Im Zuge dessen wächst die regenerative verbraucherferne Erzeugerleistung stetig an. Dies hat zur Folge, dass das bestehende Energieversorgungsnetz nach und nach an seine Belastungsgrenzen stößt. Um die Versorgungszuverlässigkeit gewährleisten zu können, muss das bestehende Energieversorgungsnetz an den erhöhten Energietransport angepasst werden. Mit dem damit verbundenen Netzausbau werden neue Trassen geplant sowie bestehende Trassen verstärkt. Es ergeben sich mitunter komplexe Leitungsstrukturen, welche aufwendig geplant und in den kommenden Jahren errichtet werden müssen. Der in [1] beschriebene Bedarf von 500 km AC-Neubau sowie 3700 km AC-Netzverstärkung bis zum Jahr 2035 führt zu einem stark steigenden Planungsaufwand.

Konventionelle Planungsansätze beinhalten nach dem Stand der Technik die vereinfachte Berechnung von elektrischen Parametern unter Annahme des symmetrischen Betriebs von Leitungen. Detaillierte Berechnungen bei einem unsymmetrischen Betrieb werden, während der Planungsphase, momentan nicht durchgeführt.

Die korrekte Verdrillung von Freileitungen ist für den optimalen Betrieb von entscheidender Bedeutung. Oftmals wird die Leiterfolge in einem späten Planungsschritt festgelegt. Da erst in diesem Planungsschritt die Masttypen und deren Standorte festgelegt werden, kann dies eine nicht optimale Verdrillung zur Folge haben. Ungünstig verdrillte Leitungen führen unter anderem zu unsymmetrischen Strömen und Spannungen an Netzverknüpfungspunkten und können eine erhöhte Feldbelastung im unmittelbaren Bereich der Leitung zur Folge haben. Die korrekte Auslegung der Verdrillung sollte deshalb parallel zur Festlegung der Maststandorte erfolgen und in einem frühen Planungsschritt berücksichtigt werden. Mit einem neuen Planungsansatz, welcher auf die Methode des „Building Information Modeling“ (BIM) als vernetztes Gesamtmodell zurückgreift, werden zukünftig derartige Berechnungen möglich. Wesentlicher Vorteil des Modellierungsansatzes ist es, dass auch Einflussparameter, wie parallele Leitungen und Rohre, wie z.B. Pipelines, die Bodenbeschaffenheit, der Baugrund und Gewässer bei der Modellbildung berücksichtigt werden. Auf diese Weise können eventuell auftretende Probleme im späteren Betrieb frühzeitig erkannt und entsprechende Gegenmaßnahmen schon vor dem Bau der Leitung ergriffen werden.

Das Forschungsprojekt „EnergyBIM“ verfolgt das Ziel elektrische Berechnungen in frühen Phasen der Planung Parameter gestützt durchzuführen. Dies erfolgt in Zusammenarbeit mit

der Planungssoftware KorFin®<sup>1</sup> der Firma A+S Consult als Partnerfirma. Ausgangspunkt ist die Projektierung der Leitung durch den Endanwender. Dabei werden gegenwärtig die Eingabedaten zentral durch übergeordnete Rechensysteme verarbeitet. Durch den Aufbau eines vernetzten Gesamtmodells, welches unter anderem weitere Strukturprojekte, aber auch Baugrund und Vermessungsdaten, beinhaltet, können gegenwärtig Leitungen und andere Infrastrukturprojekte detailliert geplant werden.

Durch die Anbindung einer Datenverarbeitung am IEEH der TU Dresden werden die aufgearbeiteten Trassierungsdaten zur Erstellung elektrischer Leitungsmodelle integriert. Durch entsprechende Algorithmen können relevante Kenngrößen berechnet werden, sodass die Abschätzung des elektrischen Verhaltens prognostiziert werden kann. Durch die Übergabe der aufbereiteten Berechnungsgrößen können diese dann dem Endanwender zur Verfügung gestellt werden.

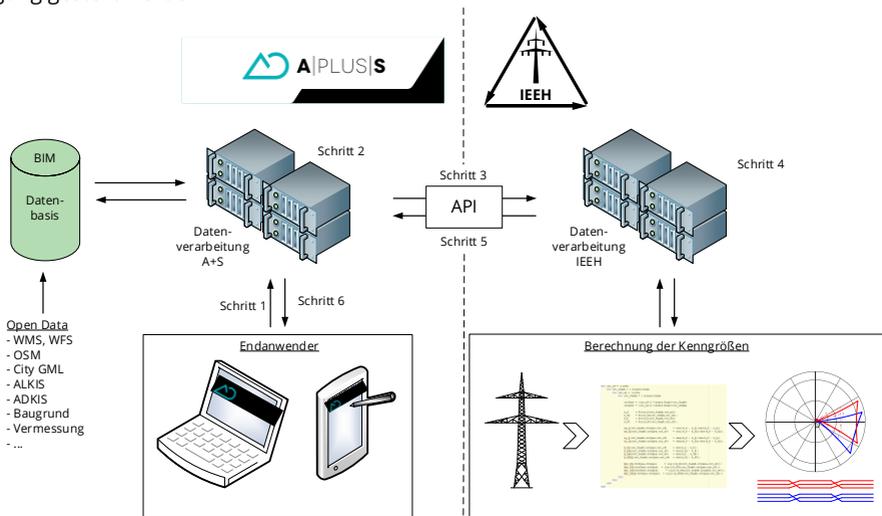


Bild 1: Übersichtsstruktur zum Projekt „EnergyBIM“

[1] Bundesnetzagentur, „Bedarfsermittlung 2021-2035 Bestätigung Netzentwicklungsplan Strom,“ 01 2023. [Online]. Available: [https://data.netzausbau.de/2035-2021/NEP2035\\_Bestaetigung.pdf](https://data.netzausbau.de/2035-2021/NEP2035_Bestaetigung.pdf). [Zugriff am 15.11.2023]

<sup>1</sup> <https://www.korfin.de/energie.html>



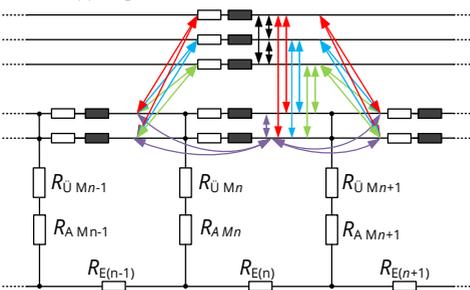
**Thanh Binh Nguyen, Dipl.-Ing.**

**Erarbeitung eines Modells zur Berechnung der Nullimpedanz von Freileitungen unter Berücksichtigung der endlichen Leitungslänge und Mastausbreitungswiderstände**

Zur Untersuchung des Systemverhaltens von Freileitungen werden diese durch geeignete Leitungsmodelle abgebildet. Die Genauigkeit des Leitungsmodells hängt dabei vom gewählten Ersatzschaltbild bzw. Berechnungsansatz ab. Der Einfluss von Erdseilen wird häufig unter der Annahme einer ideal leitenden Erdverbindung im Leitungsmodell berücksichtigt. Darüber hinaus werden zur Berechnung der induktiven Verkopplung konventionell unendlich lange Leiter-Erde-Schleifen betrachtet. Der Ansatz geht dabei von einem in Leitungsrichtung homogenen Feldbild aus. Abweichungen von diesem Ansatz treten zum Beispiel am Leitungsanfang und -ende sowie in der Nähe von Verdrillungsmasten auf, da in diesen Bereichen kein homogenes Feld zu erwarten ist. Ebenfalls können Erd- und LWL-Seile nicht als unendlich lang angenommen werden, da durch die spannungsfeldweise Erdung Ausgleichsströme in jedem Spannungsfeld auftreten, sodass auch hier der Ansatz eines homogenen Feldbildes nicht erfüllt ist. Um ein realitätsnäheres Leitungsmodell zu entwickeln, wurden in einem erweiterten Berechnungsmodell die Erdseile als endlich lange Leiter behandelt, und die Ausbreitungswiderstände der Masterdungsanlage berücksichtigt. Zur Berechnung der Impedanz von endlich langen Leitern über der Erdoberfläche werden Hertzsche Dipole verwendet. Dies führt zur Entwicklung eines komplexen Integrals:

$$\underline{Z} = \frac{j\omega\mu}{4\pi} \int_A^B \int_{A_0}^{B_0} \int_0^\infty \left( \frac{v}{\alpha_1} \cdot e^{-\alpha_1(z_0-z)} + \frac{v}{\alpha_1} \cdot \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \cdot e^{-\alpha_1(z_0+z)} \right) \mathbf{J}_0(\rho v) dv ds_0 ds \quad (1)$$

- ↔ Kopplung ES mit L1
- ↔ Kopplung ES mit L2
- ↔ Kopplung ES mit L3
- ↔ Kopplung zwischen LS
- ↔ Kopplung zwischen ES



Für die praktische Anwendung und die Implementierung in MATLAB kann Gl. (1) für Selbstimpedanz nach [1] und für die Koppelimpedanz asymptotisch durch den Vierbild-Ansatz nach [2] angenähert werden. Die resultierenden Formeln dienen als Grundlage für das erweiterte Leitungsmodell. Bild 1 zeigt beispielhaft einen Teil der modellierten Leitung mit 2 Erdseilen unter Berücksichtigung der auftretenden Kopplungen und Zusatzwiderständen im Netzwerk. Das Modell wurde durch Netzwerkanalyse entwickelt, wobei die Strom- und Spannungsbeziehungen, die Knoten- und Maschengleichungen der Erdseilkette sowie die Kopplungen

Bild 1: Freileitungsmodell

zwischen Leiter- und Erdseilen durch ein vollständiges Kirchhoffsches Gleichungssystem (VKGS) in Matrixform nach Gl. (2) beschrieben werden.

$$\begin{bmatrix} \text{UI-Beziehung der LS} \\ \text{Kopplung auf Erdseile durch Ströme in LS} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \text{Rückkopplung auf Leiterseile durch Ströme in ES} \\ \text{UI-Beziehung, Maschen- und Knotengleichung der Erdseilkette} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{LS}, I_{LS} \text{ aller Spannungsfelder} \\ U_M, \Delta U_{ES}, I_{ES} \text{ aller Spannungsfelder} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Angabe der Spannung oder Ströme} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Zur Berechnung der Leitungsparameter werden zusätzlich die Messschaltungen einer Leitungsparametermessung im VKGS berücksichtigt. Diese können dann durch Lösung des VKGS mittels Invertierung bestimmt werden. Die Validierung des neuen Modells erfolgte anhand einer fiktiven 100 km langen Doppelleitung mit 300 Donaumasten gleicher Bauart, unter Vernachlässigung der Ausbreitungswiderstände der Masterder. Es zeigt sich, dass die Ergebnisse des Modells mit denen des konventionellen Modells mit symmetrischen Komponenten übereinstimmen. Des Weiteren wurden Parameterstudien zu den Einflussfaktoren durchgeführt, welche den spezifischen Erdwiderstand, den Mastausbreitungswiderstand, den Bodenabstand, das Seilmaterial, das Mastdesign, die Anzahl und Position der Erdseile sowie die Verdrehung beinhalteten. Das Ergebnis zeigt, dass die Mitimpedanz nahezu unverändert bleibt, während die Nullimpedanz besonders sensibel auf Parameteränderungen reagiert, insbesondere auf den spezifischen Erdwiderstand, die Anzahl und Position der Erdseile sowie den Mastausbreitungswiderstand. Bild 2 zeigt die Abweichung der gemeinsamen Nullimpedanz der Doppelleitung sowie der verkürzten Nullimpedanz von den Referenzwiderständen bei Mastausbreitungswiderständen  $R_M = 0 \Omega$  und spezifischen Erdwiderstand  $\rho_E = 100 \Omega\text{m}$  (markiert mit einem roten Punkt) dargestellt.

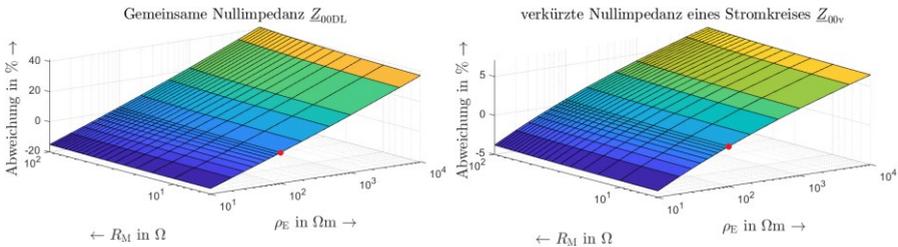


Bild 2: Abweichung der Nullimpedanz bei Änderung  $R_M$  und  $\rho_E$  vom Referenzfall

Je mehr Erdseile vorhanden sind, desto kleiner ist die Nullimpedanz. Die verkürzte Nullimpedanz  $Z_{00V}$  ist von der Parameteränderung am wenigsten betroffen. Der Grund dafür sind die zusätzlichen Erdseile, die zusammen mit dem Erdreich dem Stromrückfluss dienen und somit den der erdgebundenen Einflussfaktoren reduzieren.

[1] C. Liebermann, "Berechnung induzierter Spannungen bei Leiter- und Erdseilzug auf 380-kV-Freileitungen", Diplomarbeit: TU-Dresden, 2015.

[2] S.F. Mahmoud und A.D. Metwaly, "New image representation for dipoles near a dissipative earth 1. Diskrete images", Radio Science, pp. 1271-1275, 1981.



Yinan Zhang, M. Sc.

**Power system protection for electrical grids with bulk penetration of inverter based energy resources**

Supported by:



on the basis of a decision by the German Bundestag

The massive penetration of renewable energy resources (RES) in the power grids brings a series of problems to the power system protection, e.g. protection blinding, sympathetic tripping and unintentional islanding [1]. In the project UMZUG, the conventional protection concepts for power grids with RES integration in the form of Virtual Synchronous Machine (VSM) are investigated through simulation studies.

In one study, different parameters which influence the accuracy of distance protection in networks with VSM are investigated [2]. The investigation is carried out in the 20 kV network model as shown in Fig.1.

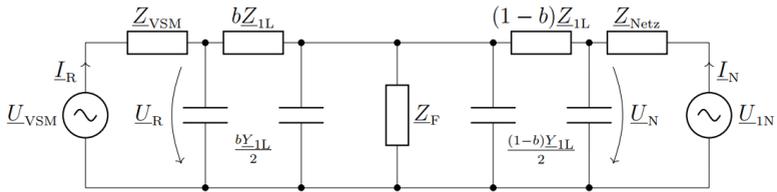


Figure 1: Simulation network model [2]

Firstly the analytical analysis of the network is in the symmetrical components system carried out and verified. Afterwards three-phase fault and one-phase fault are simulated under the variation of parameters like the position of fault, Short Circuit Ratio (SCR) and fault impedance.

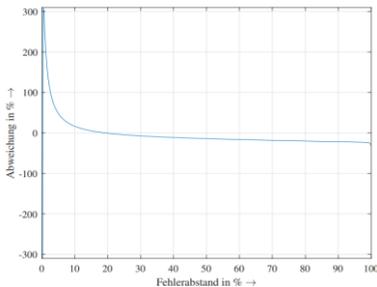


Figure 2: Relative accuracy of distance protection at VSM [2]

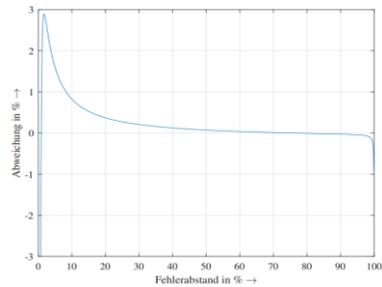


Figure 3: Relative accuracy of distance protection at 20 kV power feed [2]

It is shown from the simulation that all the three parameters mentioned above have significant influence on the accuracy of distance protection. For example, the influence of fault position on the accuracy in the case of three-phase fault is shown in Figure 2 and Figure 3, which demonstrates that faults near VSM could significantly influence the function of distance protection.

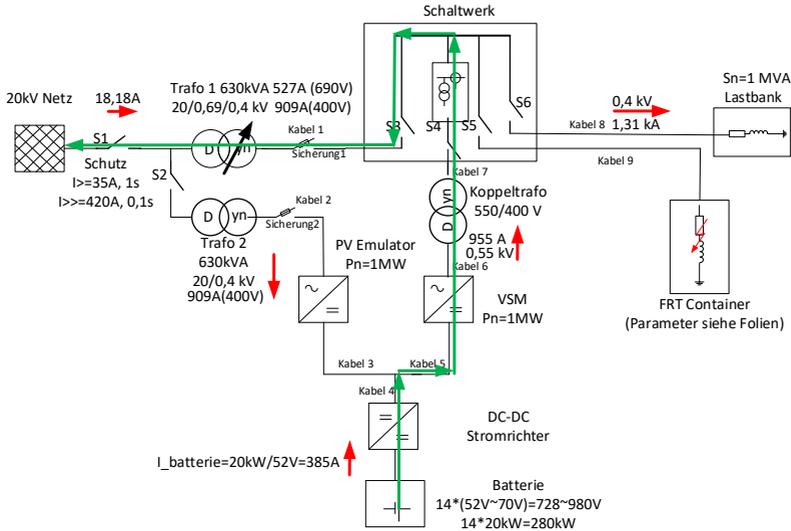


Figure 4: Scenario power reverse feed of battery through VSM

In order to verify the influence of different parameters, a test network with VSM and battery system is designed as shown in Fig. 4. Further investigations will be focused on test of protection relays under various scenarios in the test network in Matlab.

[1] V. Telukunta, J. Pradhan, A. Agrawal, M. Singh, S.G. Srivani, Protection challenges under bulk penetration of renewable energy resources in power systems: A review. In: CSEE Journal of Power and Energy Systems Bd. 3, Nr. 4, S. 365–379, 2017.

[2] K. Kutter, Systematische Analyse von Einflussfaktoren für die Genauigkeit des Distanzschutzes in Netzen mit VSM (virtuelle Synchronmaschine) Einspeisung, Studienarbeit: IEH TU-Dresden, 2023

## Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Smart Grid“



Laura Fiedler, Dipl.-Ing.

**DIGITECHNETZ –  
Digitalisierungstechnologien für die  
Betriebsführung von  
Niederspannungsnetzen**

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Eine Vielzahl leistungsintensiver Erzeuger und Verbraucher, darunter Photovoltaikanlagen, Wärmepumpen und Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge, werden an die Niederspannungsnetze angeschlossen. In absehbarer Zeit sind die Netzkapazitäten dieser Netze durch die deutlich höhere Belastung ausgereizt. Kurzfristig müsste deshalb eine hohe Anzahl der Niederspannungsnetze ertüchtigt werden. Dies ist aus personellen, logistischen und ökonomischen Gesichtspunkten problematisch, weshalb es einer Digitalisierung der Niederspannungsnetze bedarf [1]. Die aktuellen Anpassungen der regulatorischen Rahmenbedingungen, wie etwa die Überarbeitung des §14a EnWG oder der Erlass des Gesetzes zum Neustart der Digitalisierung der Energiewende, unterstreichen nicht nur die Notwendigkeit der Digitalisierung, sondern beschleunigen auch deren Umsetzung. Das Installieren digitaler Messtechnik sowie fernsteuerbarer Regelungsmöglichkeiten gewährleistet die Beobachtbarkeit und Steuerbarkeit der Niederspannungsnetze. Anschließend kann in diesen mit Digitalisierungstechnologien ausgestatteten Niederspannungsnetzen die Automatisierung des Netzbetriebs etabliert werden. Dadurch lassen sich die vorhandenen Netzkapazitäten effektiver ausnutzen und der anstehende Netzausbau reduzieren bzw. verzögern.

Gegenstand des Projektes DIGITECHNETZ ist es, Betriebsführungskonzepte für einen aktiven Niederspannungsnetzbetrieb zu entwickeln, deren Funktionalität umfassend in Hardware-In-The-Loop Tests zu erproben und die neuartigen Betriebskonzepte anschließend in Pilotnetzen einzusetzen. Es ist darüber hinaus angedacht, die entwickelte Systemlösung nach Ende der Projektlaufzeit in den Netzbetrieb des beteiligten Netzbetreibers zu integrieren.

Das Herzstück des Automatisierungssystems ist die Datenplattform. Die Implementierung einer geeigneten Datenablage- und Datenkoordinationsstruktur, welche die informationstechnische Anbindung an verschiedenste Bestandssysteme gewährleistet, ist eine Kernaufgabe des Projektes DIGITECHNETZ. In der Plattform laufen perspektivisch Millionen von Bewegungsdaten wie Mess- und Prognosewerten sowie Stamm- und Topologie-Daten ein. Diese Datenplattform verfügt über die notwendige Flexibilität und Skalierbarkeit, um mit stetig neuen Funktionalitäten und enormen Datenmengen umzugehen.

Auf diesen Basis-Funktionalitäten der Plattform setzen modular organisierte Dienste auf. Die Module enthalten dabei Mehrwert-Dienste, welche die in der Plattform gesammelten Daten aufbereitet und für die HEO-Dienste (**H**öhere **E**ntscheidung und **O**ptimierung) zur Verfügung stellen. Letztere fungieren als künstliche Entscheidungsträger. Beispielsweise

werden im Modul „Messwertbasierte Netzzustandsüberwachung“ die aus intelligenten Messsystemen und aus Abgangsmessungen einlaufenden Werte über den Mehrwert-Dienst State Estimation aufbereitet. Anschließend nutzt der HEO-Dienst Netzzustandsbewertung diese Ergebnisse, um über den aktuellen Netzzustand zu entscheiden. Analog kann der zukünftige Netzzustand basierend auf Prognosedaten ermittelt werden. Zudem wird ein Modul für das Netzengpassmanagement entwickelt. Dieses berechnet geeignete Steuersignale zur Behebung vorliegender Engpässe. Dabei sollen regelbasierte und optimierungsbasierte Berechnungsansätze unter der Berücksichtigung der aktuellen gesetzlichen Rahmenbedingungen untersucht werden. Eine Übersicht zur Plattform, ihren Umsystemen sowie den Funktionsmodulen ist in Bild 1 dargestellt.

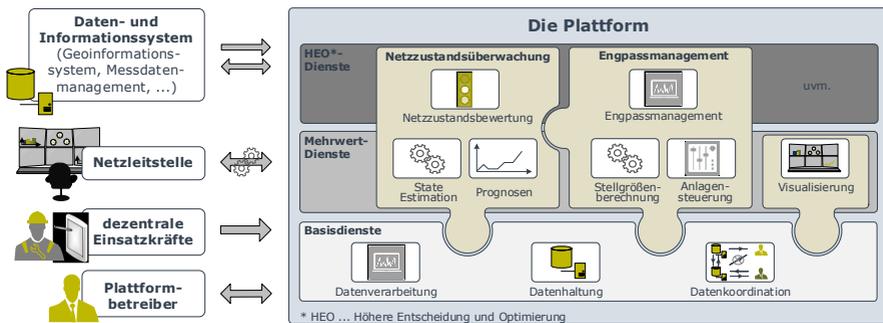
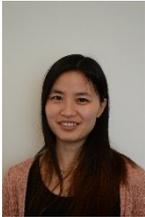


Bild 1: Darstellung der Datenplattform mit der Anbindung an Umsysteme sowie der modularen und hierarchischen Dienste-Architektur

Die modulare Struktur ermöglicht die Interoperabilität der Plattform und der entwickelten Software. Entsprechend könnten die Softwarelösungen nach Projektende auch in anderen Automatisierungssystemen zum Einsatz kommen. Ein weiterer Vorteil der Plattform-Architektur und der Modul-Struktur ist die Erweiterbarkeit. So könnten zusätzliche Schnittstellen für die netzbetreiberübergreifende Kommunikation und Koordination geschaffen und entsprechende Dienste z.B. für die Bereitstellung von Systemdienstleistungen implementiert werden.

Die gegenwärtigen Projektaktivitäten beschäftigen sich mit der Finalisierung der Datenablagestruktur sowie den Datenmodellen. Ebenso werden die Pilotnetze mit der notwendigen Messtechnik ausgestattet und der Hardware-In-The-Loop Test vorbereitet. Letzterer soll im Frühjahr 2024 beginnen. Schwerpunkt der Projektarbeit am Institut ist zudem die Entwicklungen verschiedener Mehrwert- und HEO-Dienste. So wird unter anderem eine für Niederspannungsnetze weiterentwickelte State Estimation implementiert. Des Weiteren sind Optimal-Power-Flow-Algorithmen, mit denen Unsicherheiten bei der Berechnung von Stellgrößen für das Engpassmanagement berücksichtigt werden können, Gegenstand aktueller Forschung.

[1] VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., *Hochautomatisierung von Nieder- und Mittelspannungsnetzen: VDE Studie*. Offenbach am Main, 2023.



**Liya Ma, Dipl.-Ing.**

### **Echtzeitsimulation eines Prosumers im Combined Energy Lab 3.0**

Das *Combined Energy Lab* (CEL) 3.0 am IEEH ermöglicht die Untersuchungen eines Prosumers aus energetischer und kommunikationstechnischer Perspektive. Die Umsetzung basiert auf dem Prinzip des Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL). Im PHIL wird ein Testobjekt in eine Simulationsumgebung eingebunden, wobei ein tatsächlicher Leistungsaustausch zwischen dem Testobjekt und der Simulationsumgebung stattfindet. Die Konzeption des CEL 3.0 wird im Bild 1 dargestellt. Die simulierten Komponenten umfassen die Photovoltaikanlage (PV-Anlage), das Elektrofahrzeug, die allgemeine elektrische Last und gegebenenfalls das Stromnetz. Die Simulation ermöglicht es, unterschiedliche Anlagenkonfigurationen unter definierten Randbedingungen zur betrachten. Durch den Einsatz eines Messsystems werden die Gesamtenergieflüsse sowie Energieflüsse in die einzelnen Abzweigungen erfasst.

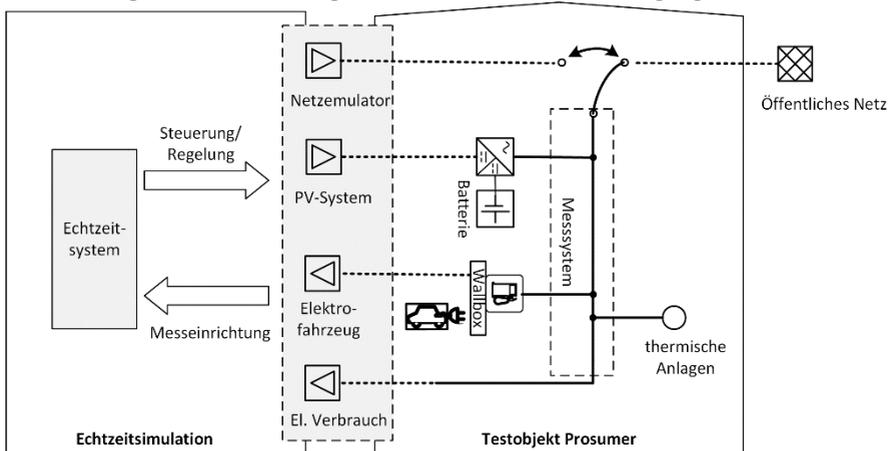


Bild 1: Konzept des CEL

Die Leistungsausgabe der simulierten Komponenten erfolgt direkt über verschiedene Leistungsverstärker. Um eine realistische Darstellung eines Prosumers zu gewährleisten, wird ein Echtzeitsystem zur Steuerung und Regelung der Leistungsverstärker eingesetzt. Dieses System zeichnet sich durch ausreichende Rechenkapazität, eine hohe Abtastrate und die Fähigkeit zur simultanen Steuerung mehrerer Komponenten aus. Somit können die nachstehenden Anforderungen an Simulationen erfüllt werden.

### **Netzemulator**

Der Netzemulator simuliert das Niederspannungsnetz und ist in der Lage, verschiedene Spannungsverläufe vorzugeben. Dies gewährleistet einerseits eine realitätsnahe Untersuchung mit einem breiten Anwendungsbereich und andererseits die Analyse der Netzrückwirkungen von CEL-Komponenten. Bei der Spannungsquelle ist es entscheidend, dass alle drei Phasen synchronisiert gesteuert werden können.

### **PV-System**

Für den Wechselrichter und die Batterie stehen echte Anlagen zur Verfügung. Das Energiemanagement hierbei kann mit Hilfe des Wechselrichters realisiert werden. In diesem Kontext ist es erforderlich, lediglich die PV-Anlage zu emulieren. Dabei sollen unterschiedliche Typen und Größen berücksichtigt und die Simulation der Tageserträge unter verschiedenen Wetterbedingungen abgebildet werden.

Eine technische Anforderung für die Simulation besteht darin, dass der PV-Emulator nahtlos mit dem Wechselrichter zusammenarbeiten kann. Dies erfordert, dass der Spannungs- und Stromverlauf des PV-Emulators der I-U-Kennlinie einer Solarzelle entspricht, um einen sinnvollen Betrieb des Maximum Power Point Trackers vom Wechselrichter zu ermöglichen. Ein hochgeschwindigkeitsfähiger Regelkreis zwischen dem Echtzeitsystem, dem Leistungsverstärker und dem Wechselrichter ist dabei unerlässlich.

### **Elektrofahrzeug**

Es wird eine Wallbox installiert, die es ermöglicht, ein reales Elektrofahrzeug direkt anzuschließen. Darüber hinaus können auch emulierte Fahrzeuge an die Wallbox angeschlossen werden. Im Rahmen der zulässigen Leistungen der Wallbox ist es ebenfalls erforderlich, verschiedene Fahrzeuge zu emulieren. Hinsichtlich der Kommunikationstechnik und des Ladeprozesses ist die Einhaltung der DIN EN IEC 61851 [1] zu beachten. Des Weiteren sollen ausgewählte typische Ladeverfahren der Batterie, wie beispielsweise das CC-CV-Ladeverfahren, abgebildet werden [2].

### **Elektrische Verbraucher**

Die Simulation behandelt den Gesamtverbrauch herkömmlicher elektrischer Haushaltsgeräte, die in drei Phasen separat betrachtet werden. Ausgenommen davon sind leistungsintensive Anlagen, wie beispielsweise Wärmepumpen und Elektrofahrzeuge. Die Anpassungsmöglichkeiten für Blindleistung und Harmonische sind vorhanden, stehen jedoch nicht im Zentrum der Untersuchungen.

### **Gesamtsystem**

Das Gesamtsystem zielt darauf ab, dass die zeitlichen Energieflüsse der simulierten Komponenten mit der Realität korrelieren. Sowohl die einzelnen Komponenten als auch das Gesamtsystem sollen in der Lage sein, rasch auf interne und externe Veränderungen oder Anreize zu reagieren. Darüber hinaus ermöglicht das System die Abbildung verschiedener Haushaltstypen und Szenarien. Auf diese Weise gewährleistet das dargestellte PHIL-System detaillierte Untersuchungen von Prosumern unter variablen Randbedingungen.

[1] DIN EN IEC 61851-1: 2019. Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge. Teil1: Allgemeine Anforderungen.

[2] W. Shen, T. T. Vo, und A. Kapoor.: Charging algorithms of lithium-ion batteries: Anoverview. In: 2012 7th IEEE conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Singapur: IEEE, 2012, S. 1567-1572. ISBN: 978-1-4577-2119-9. doi: 10.1109/ICIEA. 2012.6360973.



**Marcus Kreutziger, Dipl.-Ing.**

**Entwicklung eines zellularen Energiekonzepts im ländlichen Raum – Projektvorstellung „ZellSys“**

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Die Herausforderungen der Energie-, Wärme- und Mobilitätswende spiegeln sich in allen Energiesektoren wider. Dies spielt insbesondere für die Region der Lausitz aufgrund der Abschaltung des Braunkohle-Großkraftwerks „Schwarze Pumpe“ eine große Rolle. Somit werden bis spätestens zum Ende der Kohleförderung im Jahr 2038 alternative Konzepte zur Wärme- und Elektrizitätsversorgung in der Region benötigt. Im Mittelpunkt des Projekts stehen hierbei ländliche Gebiete. Es soll ein flexibles, zellular aufgebautes Energiesystem etabliert werden, das die Sektoren Gas, Wärme, Elektrizität und Mobilität verbindet und koordiniert (siehe Bild 1). Dabei sind nicht nur die Verwaltungen der Städte, Unternehmen sowie Forschung gefragt, sondern auch die Bedürfnisse der Bürger spielen eine zentrale Rolle.

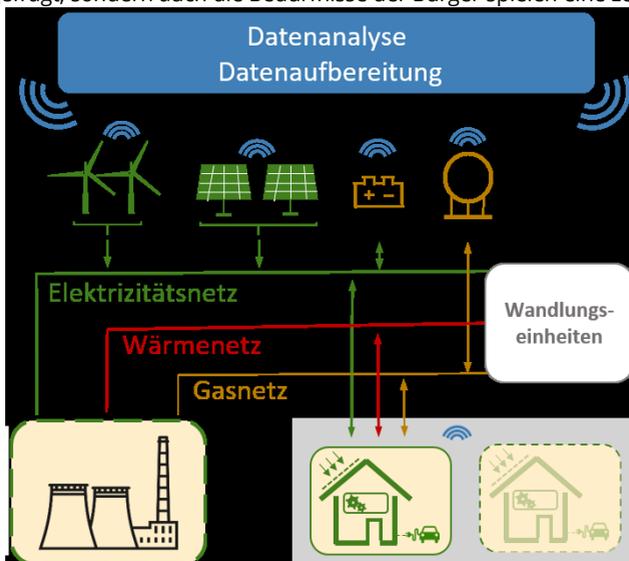


Bild 1: Systematik Energiesystem mit Sektorenkopplung (nach [1])

Im Fokus der Untersuchung steht eine Machbarkeitsstudie zur Neugestaltung des bestehenden Energiesystems im suburbanen Raum der Stadt Hoyerswerda. Dabei wird die ländlich geprägte Kleinstadt Wittichenau in energetischer Wechselwirkung mit den umliegenden Städten betrachtet. Im ersten Schritt wird der Bedarf an Wärme und Strom der Gebäude

ermittelt. Darauf aufbauend werden mögliche Szenarien zur Umgestaltung der Energieversorgung untersucht. Durch die Kombination nachhaltiger Technologien und flexibler Einsatzszenarien werden Vorteile für die energetische Selbstversorgung erwartet. Begleitet wird das Vorhaben durch umfangreiche Bürger- und Unternehmensbefragungen.

Im Ergebnis entsteht ein Leitfaden für den Wandel einer zentralen Versorgungsstruktur zu regional wechselwirkenden Energiezellen. Das entwickelte Konzept soll dabei auf andere Regionen in Sachsen und Deutschland übertragbar sein. Bild 2 zeigt den zellularen Ansatz Stadt-Land.

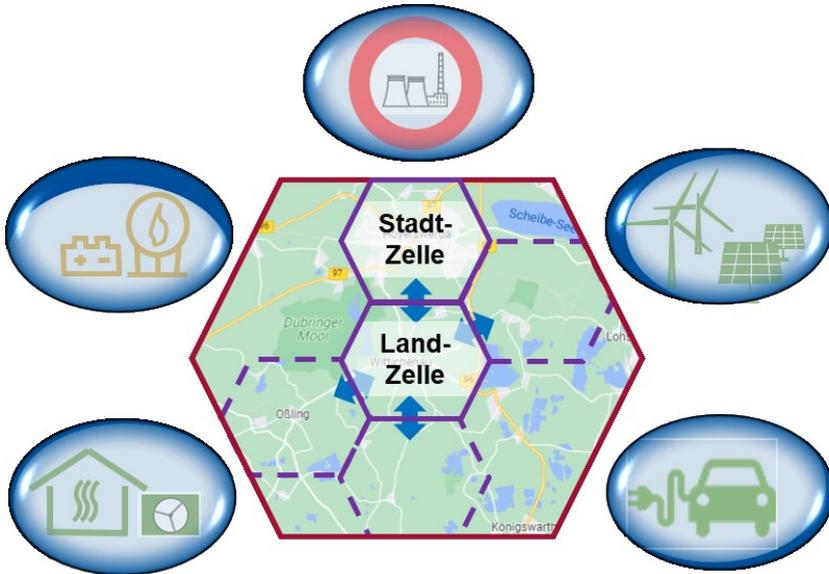


Bild 2: Zellulärer Ansatz Stadt-Land (nach [1])

In der ersten Projektphase wurde die Bestandsaufnahme durchgeführt. Hierfür wurde ein georeferenziertes Modell mit allen relevanten elektrischen und wärmetechnischen Kenngrößen erstellt. Dieses Modell bildet die Basis für die zu untersuchenden Ausbauszenarien. Parallel wurde die Bürgerbefragung durchgeführt. Die Befragung soll dabei einen Einblick in das aktuelle Nutzungsverhalten geben sowie die grundlegende Einstellung zur Energiewende widerspiegeln. Mit einer Antwortquote von über 20 % kann die Befragung als großer Erfolg gewertet werden. Die Ergebnisse der Befragung, werden in einer Bürgerversammlung vorgestellt und fließen in die Szenarioentwicklung ein.

[1] J. Seifert, P. Schegner, M. Kreutziger, et.al.; Projektflyer – „ZellSys“; TU Dresden; 2023



**Marta Sophia Potyka, Dipl.-Ing.**

**Analyse von zeitlichen  
Verschiebungsoptionen elektrischer  
Lasten**

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Durch einen stetigen Zuwachs an erneuerbaren und damit zumeist volatilen Dezentralen Erzeugungsanlagen (DEA) wächst die Herausforderung, das elektrische Netz stabil und zuverlässig betreiben zu können. Im Fall von Leistungsüberschüssen, die nicht über das Elektrizitätsversorgungssystem übertragen werden können, besteht der aktuelle Lösungsansatz darin, DEAs abzuregeln (siehe EnWG §13). In Hinblick auf die derzeitige Energiekrise erscheint es allerdings unökonomisch, verfügbare elektrische Leistung nicht zu nutzen. Daher wurde ein Analyseverfahren entwickelt, mit dem die Optionen einer zeitlichen Verschiebung von Lasten untersucht wurde. Das Ziel ist es, den Leistungsbedarf möglichst mit der verfügbaren Leistung von beispielsweise Photovoltaik-Anlagen (PVA) zu decken. Damit kann der Eigenverbrauchsanteil erhöht und somit Kosten eingespart werden.

Im Folgenden soll ein mittelständiges, industrielles Unternehmen als Beispiel dienen, das eine PVA als DEA sowie eine Wärmepumpe (WP) als größere Last betreibt. Die WP arbeitet dort vor allem nachts, während die PVA tagsüber Leistung bereitstellt. Es wird der Januar 2022 untersucht. Für die Analyse wurden zuerst mögliche Betriebszeiten und die dazugehörige elektrische Energie der WP  $E_{el,max,d WP}$  ermittelt. Dafür wurde eine Rastersuche mit einer Betriebsdauer zwischen 10 und 20 Stunden und verschiedenen Zeitpunkten durchgeführt. Für jede ermittelte Betriebszeit wurde das Verhältnis der zeitlichen Überlappung von der WP mit der PVA  $r_{\text{über}}$  (siehe Gl. (1)), die Autarkie-  $a$  (siehe Gl. (2)) und die Eigenverbrauchsrate  $e$  (siehe Gl. (3)) berechnet.

$$r_{\text{über}} = \frac{\sum t_{\text{zus}}}{\sum t_{\text{prod}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

$$a = \left( 1 - \frac{E_{\text{speis}}}{E_{\text{bezug}}} \right) \cdot 100\% \quad (2)$$

$$e = \frac{E_{\text{bezug}} - E_{\text{speis}}}{E_{\text{prod}}} \cdot 100\% \quad (3)$$

$\sum t_{\text{zus}}$  ist die kumulative Zeit, in der die PVA und WP gleichzeitig in Betrieb sind und  $\sum t_{\text{prod}}$  ist die kumulative Zeit, in der nur die PVA in Betrieb ist. Das mögliche Intervall liegt zwischen 0 % und 100 % zeitlicher Überlappung. Doch selbst wenn  $r_{\text{über}} = 100\%$ , bedeutet dies nicht unbedingt, dass die erzeugte Energie für den Eigenverbrauch immer ausreichend ist. Daher wurden noch die Autarkie-  $a$  und die Eigenverbrauchsrate  $e$  berechnet.  $E_{\text{speis}}$  steht für die eingespeiste,  $E_{\text{bezug}}$  für die bezogene und  $E_{\text{prod}}$  für die bereitgestellte Energie. Der Wertebereich ist der gleiche wie für  $r_{\text{über}}$ .

Tabelle 1 listet die drei besten Ergebnisse auf. Als zwingende Voraussetzung ist der Test auf thermische Behaglichkeit zu bestehen. Diese Größe wurde im Feldtest erfragt.  $E_{el\ max\ d\ WP}$  ist je nach Betriebsdauer unterschiedlich hoch. Bei Variante 2 ist sie am höchsten.  $a$  ist bei allen drei Varianten annähernd gleich.  $e$  steigt, sobald der größte Teil der Betriebsdauer der WP in derjenigen der PVA liegt.  $r_{\text{über}}$  ist bei der ersten Variante am höchsten und bei der zweiten am zweithöchsten. Unter Einhaltung der thermischen Behaglichkeit sowie einer verbrauchs- und somit kostenarmen Betriebsweise der WP wird Variante 3 als beste Variante ausgewählt. Bild 1 zeigt den zeitlichen Verlauf der elektrischen Wirkleistung  $P$  der WP und der PVA. Auszugsweise ist nur eine Woche dargestellt, um die Zeitverläufe besser erkennen zu können. Die Ergebnisse der Tabelle beziehen sich auf den gesamten, untersuchten Monat. Für weiterführende Informationen zur Untersuchung sei auf [1] verwiesen.

Tabelle 1: Analyseergebnisse der drei besten Varianten möglicher Betriebszeiten für die WP

Parameter	Variante 1	Variante 2	Variante 3
<b>Betriebszeit</b>	7:00-18:00	3:00-18:00	5:00-16:00
$E_{el\ max\ d\ WP}$ (kWh)	88	120	88
$a$ (%)	18,71	21,91	18,00
$e$ (%)	95,34	23,92	91,75
$r_{\text{über}}$ (%)	89,47	86,42	84,21
<b>Thermische Behaglichkeit</b>	✗	✓	✓

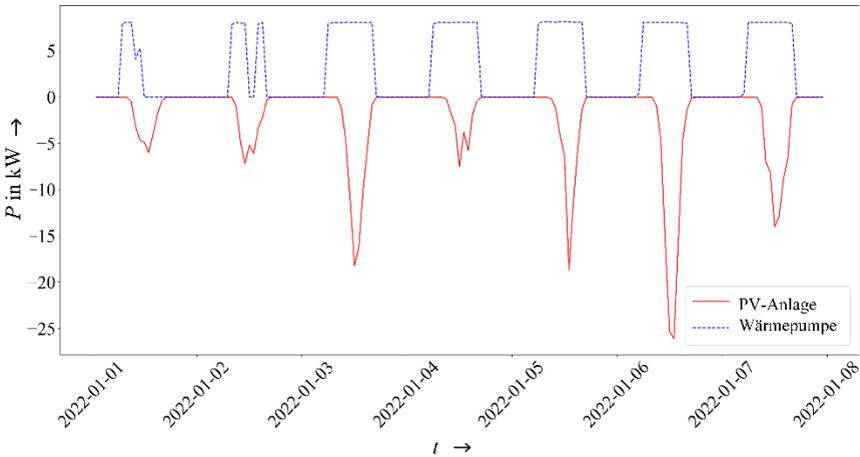


Bild 1: Zeitlicher Verlauf von Variante 3 der elektrischen Wirkleistung der WP und PVA

[1] M. S. Potyka and P. Schegner, "Example Application of an Energy Management of Energy Resources in Industrial Facilities With Renewables," IEEE EUROCON, pp. 275-279, Juli 2023.



**Sasan Jacob Rasti, Dipl.-Ing.**

## **Technologiemodelle zur Generierung von Leistungszeitreihen**

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Verteilnetze werden zunehmend von dezentralen, flexiblen Einheiten (z.B. Wärmepumpen, Photovoltaikanlagen, Elektrofahrzeuge etc.) durchdrungen, wodurch aktive Systembetriebsaspekte an Bedeutung gewinnen. Dafür fehlen standardisierte Modelle, die verwendet werden können, um den zeitlichen Verlauf von Energieverbrauch, -erzeugung und -umwandlung darzustellen und eine optimierte Berechnung von Einsatzfahrplänen und Betriebspunkten zu ermöglichen. Um diese Anforderungen umsetzen zu können, wird zunächst eine Grundebene an Daten definiert, die die Verhaltensschnittmenge aller im System zu betrachteten Technologien beschreibt und im Folgenden als *common data layer* (CDL) bezeichnet wird. Folgende Systemgrößen sind für die Erstellung der Zeitreihen relevant:

- $n_t$  Zeitschritte  $t$
- $n_i$  Energieformen  $i$

Das CDL besteht dann aus den folgenden Größen:

- Leistungsgrundlinie  $Y_{ti}$
- Leistungsgrenzen  $Y_{ti}^-$  und  $Y_{ti}^+$

Mit dem Tool *power-systems-technology-models* [1] lassen sich Leistungszeitreihen für eine Vielzahl von verschiedenen Technologien erzeugen:

- Elektrische und thermische Haushaltsbedarfe
- Photovoltaikanlagen
- Windenergieanlagen
- Elektrofahrzeuge
- Wärmepumpen
- Gasthermen
- Elektrische Direktheizungen
- Speicher
- Elektrolyseure
- Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage

Beispielhaft wird hier das Technologiemodell einer Haushalts-Luft-Wasser-Wärmepumpe vorgestellt. Im Beispielsystem werden die Energieformen Wirkleistung (1), Blindleistung (2) und Wärmeleistung (3) betrachtet. Tabelle 1 zeigt die im Beispiel verwendeten Eingangsgrößen mit Formelzeichen und Werten. Diese Größen lassen sich dann in Gleichungen (1) – (9) verwenden und somit die CDL-Größen berechnen. Gleichung (8) beschreibt den COP-Verlauf  $\eta_t$  der Wärmepumpe in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz  $\Delta T_t$  (Gleichung (7)), der in [2] empirisch bestimmt wurde.

$$Y_{t1} = Y_{t1}^- = 0 \text{ kW}; Y_{t2} = Y_{t2}^- = 0 \text{ kvar}; Y_{t3} = Y_{t3}^+ = 0 \text{ kW} \quad (1) - (3)$$

$$Y_{t1}^+ = P_{\text{HP}} \quad (4)$$

$$Y_{t2}^+ = P_{\text{HP}} \cdot \tan(\arccos(\cos \varphi)) \quad (5)$$

$$\Delta\eta = f(y) = 0,5 \tag{6}$$

$$\Delta T_t = T - T_t \tag{7}$$

$$\eta_t = f(x) = 10,29 - 0,21 \cdot \Delta T_t + 0,0012 \cdot \Delta T_t^2 + \Delta\eta \tag{8}$$

$$Y_{t3}^- = -P_{HP} \cdot \eta_t \tag{9}$$

Tabelle 1: Benötigte Eingangsdaten

Größe	Wert
Installierte elektrische Leistung $P_{HP}$	3,6 kW
Vorlauftemperatur $T$	35 °C
Wärmequellentyp $x$	Sole
Effizienz $y$	Hoch
Leistungsfaktor $\cos \varphi$	0,8
Außentemperatur $T_t$	Zeitreihe (Bild 1)

Die Leistungsgrundlinien aller Energieformen werden auf 0 gesetzt, da keine Aussage über das tatsächliche Betriebsverhalten der Wärmepumpe getroffen werden kann. Die Maximalgrenze der Wirkleistung entspricht der installierten elektrischen Leistung, die potenziell zu jedem Zeitpunkt abgerufen werden kann. Die Minimalgrenze der thermischen Leistung ist allerdings über den COP abhängig vom Differenzverlauf zwischen Ziel- und Außentemperatur (Bild 1). Der COP sowie die thermischen Leistungsgrenzen sind in Bild 2 dargestellt.

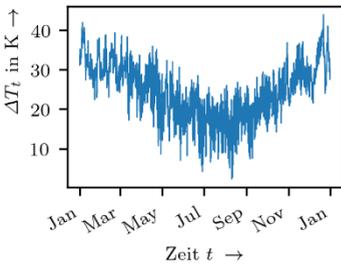


Bild 1: Temperaturverlauf  $\Delta T_t$  am Wärmepumpenstandort

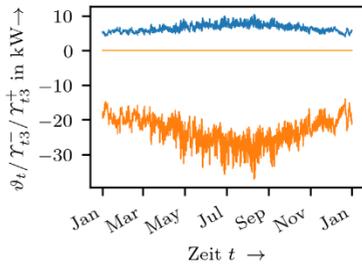


Bild 2: Resultierender COP  $\eta_t$  (blau) und thermische Leistungsflexibilität  $[Y_{t3}^-, Y_{t3}^+]$  (orange)

Die benötigten Eingangsdaten sowie Konversionsparameter und -formeln der restlichen Technologien lassen sich im Detail in [3] nachlesen.

[1] S. J. Rasti, „power-system-technology-models: A toolbox to create multi-energy power time series for different technologies in steady-state simulations of energy systems.“, GitHub. Zugriffen: 23. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/ieeh-tu-dresden/power-system-technology-models>

[2] O. Ruhnau, L. Hirth, und A. Praktiknjo, „Time series of heat demand and heat pump efficiency for energy system modeling“, Sci Data, Bd. 6, Nr. 1, S. 189, Dez. 2019, doi: 10.1038/s41597-019-0199-y.

[3] S. J. Rasti, H. Kramer, F. Flatter, P. Schegner, C. Weber, und S. Goetz, „Generic technology models to simulate flexible operation in multi-energy cellular energy systems“, CIRED, Rome, Juni 2023.



**Maximilian Schmidt, Dipl.-Ing.**

**Ermittlung nicht beobachtbarer  
Netzgrößen mit Hilfe der Nullraum-  
Analyse**

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Die Kenntnis des aktuellen Netzzustandes ist für die Netzbetriebsführung von entscheidender Bedeutung. Aufgrund der nur spärlichen Messinfrastruktur in Nieder- und Mittelspannungsnetzen sind diese Netze strukturell nicht beobachtbar. Um eine synthetische Beobachtbarkeit herbeizuführen, werden künstliche Ersatzwerte, s. g. *Pseudo-Messwerte*, herangezogen. In der Regel wird der Wirk- und Blindleistungsbezug von nicht beobachtbaren Netzknoten mit Hilfe von Pseudo-Messwerten abgebildet. Dabei sollte die Anzahl von Pseudo-Messwerten nur dem notwendigen Minimum entsprechen, um die Qualität der Zustandsberechnung nicht unnötig negativ zu beeinflussen. Mit Hilfe numerischer Analysen können diejenigen Netzknoten identifiziert werden, die mittels Pseudo-Messwerte abgebildet werden müssen.

Die Betrachtung erfolgt vereinfacht an einem linearen System. Der Zusammenhang zwischen Messvektor  $\mathbf{z}$ , der die zur Verfügung stehenden Messgrößen umfasst, und dem Zustandsvektor  $\mathbf{x}$ , der die Zustandsgrößen beinhaltet, ist durch das (lineare) Messmodell  $\mathbf{H}_z$  wie folgt gegeben:

$$\mathbf{z} = \mathbf{H}_z \cdot \mathbf{x} \quad (1)$$

Sofern das Messmodell  $\mathbf{H}_z$  keinen vollen Rang besitzt, ist das lineare System (1) nicht beobachtbar. Die Lösung kann dann allgemein durch Superposition einer partikulären Lösung  $\mathbf{x}_p$  und der Nulllösung  $\mathbf{x}_z$  angegeben werden:

$$\mathbf{x} = \mathbf{H}_z^T \cdot \mathbf{x}_p + \mathbf{Z}_z \cdot \mathbf{x}_z \quad (2)$$

Dabei ist  $\mathbf{Z}_z$  die Nullraum-Matrix, deren Spaltenvektoren den Nullraum zum unterbestimmten Gleichungssystem (1) definieren.

Durch Einsetzen von (2) in (1) und unter Berücksichtigung des Zusammenhangs

$$\mathbf{H}_z \cdot \mathbf{Z}_z = \mathbf{0} \quad (3)$$

folgt für die partikuläre Lösung nach Umstellen:

$$\mathbf{x}_p = (\mathbf{H}_z \cdot \mathbf{H}_z^T)^{-1} \cdot \mathbf{z} \quad (4)$$

Über die Leistungsgleichungen wird formal der Zusammenhang zwischen dem Wirk- bzw. Blindleistungsbezug an einem Netzknoten und dem Zustandsvektor  $\mathbf{x}$  beschrieben. Für das betrachtete System (1) wird der Zusammenhang am Beispiel der Wirkleistung eines beliebigen Netzknotens  $i$  vereinfacht über eine lineare Abbildung  $\mathbf{h}_{p_i}$  formuliert:

$$P_i = \mathbf{h}_{p_i} \cdot \mathbf{x} \quad (5)$$

Nach Einsetzen von (2) und (4) in (5) folgt für den Wirkleistungsbezug am Netzknoten  $i$ :

$$P_i = \mathbf{h}_{p_i} \cdot \mathbf{H}_z^T \cdot (\mathbf{H}_z \cdot \mathbf{H}_z^T)^{-1} \cdot \mathbf{z} + \mathbf{h}_{p_i} \cdot \mathbf{Z}_z \cdot \mathbf{x}_z \quad (6)$$

Der erste Summand in (6) stellt eine ungewichtete Kleinste-Fehlerquadrat-Lösung für den Wirkleistungsbezug dar. Im zweiten Summanden ist der dazugehörige Nulllösungsanteil enthalten.

Sofern der Wirkleistungsbezug am Netzknoten  $i$  durch den Messvektor  $\mathbf{z}$  eindeutig beschrieben ist, wird der Nulllösungsanteil in (6) zu null und  $P_i$  entspricht der Kleinste-Fehlerquadrat-Lösung. Wird der Wirkleistungsbezug stattdessen durch den Nulllösungsanteil beschrieben, enthält der Messvektor  $\mathbf{z}$  keine Information über den Wirkleistungsbezug. In diesem Fall ist ein Pseudo-Messwert notwendig. Die Notwendigkeit eines Wirkleistungs-Pseudo-Messwerts resultiert daher aus folgender Bedingung:

$$\|\mathbf{h}_{pi} \cdot \mathbf{z}_z\| > 0 \tag{7}$$

Dabei kann  $\|\cdot\|$  eine beliebige Vektornorm sein, z.B. die 2-Norm.

Die Bedingung für die Notwendigkeit eines Blindleistungs-Pseudo-Messwerts lässt sich analog formulieren.

### Beispiel

Gegeben ist das nachfolgende lineare Gleichungssystem analog zu (1):

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \tag{8}$$

Das System (8) ist nicht beobachtbar, da die letzte Zeile der Matrix eine Linearkombination der ersten und dritten Zeile darstellt. Es gilt daher:  $\text{rang}(\mathbf{H}_z) = 3 < 4$ . Der dazugehörige Nullraum wird in diesem Fall über einen Vektor mit folgenden Elementen beschrieben:

$$\mathbf{z}_z = \begin{bmatrix} -0,5 \\ 0,5 \\ -0,5 \\ 0,5 \end{bmatrix} \tag{9}$$

Der (lineare) Zusammenhang zwischen den Zustandsgrößen und der Wirkleistung an zwei beliebigen Netzknoten ist wie folgt angenommen:

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \tag{10}$$

Basierend auf der Bedingung (7) kann nun die Beobachtbarkeit der Wirkleistung geprüft werden:

$$\|[0 \ 1 \ 1 \ 0] \cdot \mathbf{z}_z\|_2 = 0 \rightarrow P_1 \text{ ist beobachtbar} \tag{11a}$$

$$\|[0 \ 1 \ 0 \ 1] \cdot \mathbf{z}_z\|_2 = 1 \rightarrow P_2 \text{ ist nicht beobachtbar} \tag{11b}$$

Für die Größe  $P_2$  ist die Bedingung (7) erfüllt. Wird die Wirkleistung  $P_2$  nun in Form eines Pseudo-Messwerts berücksichtigt und dem Messvektor hinzugefügt, erweitert sich die Messmatrix  $\mathbf{H}_z$  um den Zusammenhang für  $P_2$  aus (10). Die Messmatrix besitzt dann vollen Rang und das System ist folglich numerisch beobachtbar.

## Publikationen

### Vorträge

A. M. Blanco:

Modeling and analysis of harmonic disturbances in transmission systems. Recent advances and present challenges.

Simposio Internacional sobre Calidad de la Energía Eléctrica - SICEL 2023, Valledupar, 03.11.2023.

M. Bruhns, R. Herrmann, P. Schegner:

Charakterisierung von stromstarken Niederspannungs-Störlichtbögen im Hochleistungsprüffeld der TU Dresden.

27. VDE-Fachtagung mit Ausstellung "Albert-Keil-Kontaktseminar 2023", Karlsruhe, 27.-29.09.2023.

M. Domagk:

Prognose von Langzeitmessungen der Elektroenergiequalität.

63. Sitzung des AK Netzurückwirkung im VDE Dresden, Schmalkalden, 25.03.2023.

M. Domagk, R. Stiegler:

Challenges of measurement-based determination of frequency-dependent impedance characteristics.

transCampus Project Workshop at King's College London, London, United Kingdom, 31.05.2023.

M. Domagk:

Ergebnisse aus aktuellen Studien - Unsymmetrie, Harmonische und Emissionen von Kundenanlagen.

6. Fachtagung Netzurückwirkungen, Dresden, 21.09.2023.

M. Domagk:

Determination of equivalent circuit models for the aggregated representation of downstream HV networks.

transCampus Project Workshop at TU Dresden, Dresden, 08.11.2023.

L. Fiedler:

Approaches and methods for automation of low voltage distribution networks.

Helgoland Power and Energy Conference (HPEC) 2023, Helgoland, 14.06.2023.

V. Khokhlov:

Störfestigkeit von Haushaltgeräten.

6. Fachtagung Netzurückwirkungen,  
Dresden, 21.09.2023.

S. Krahrmer:

Marktliche Beschaffung von Schwarzstarteinheiten für den Netzwiederaufbau.

VDE Arbeitskreis Verteilnetze,  
Chemnitz, 27.-28.03.2023.

S. Krahrmer:

Automatisierte Netzanalyse in PowerFactory durch Nutzung der Powerfactory Tools.

VDE Arbeitskreis Verteilnetze,  
Hamburg, 20.-21.11.2023.

S. Krahrmer, P. Schegner:

All Electric Society - Die Elektrische Energieversorgung als Rückgrat unserer Gesellschaft.

Integrale-Ringvorlesung "Thinking about technology", TU Dresden,  
Dresden, 23.05.2023.

S. Ecklebe, S. Krahrmer:

Projekt STABEEL - Stabilität dezentraler Erzeuger im Elektroenergieversorgungsnetz bei der Erbringung von Systemdienstleistungen.

AES/VDE-Kolloquium, FH Zwickau ,  
Zwickau, 12.12.2023.

C. Liebermann:

Effects of unfavorably transposed transmission lines.

Power and Energy Student Summit 2023,  
Bielefeld, 17.11.2023.

J. Meyer:

Power Quality Challenges related to (islanded) AC-Microgrids.

IGCS Winter School 2023:

Microgrid – A Key Contribution Towards A Carbon Neutral Society,  
Chennai, Indien, 23.02.2023.

J. Meyer:

Auswirkung moderner Geräte auf die Qualität der Elektroenergie.

Sächsische Physikolympiade Martin-Andersen-Nexö-Gymnasium,  
Dresden, 09.03.2023.

J. Meyer:

Interaction and grid impact of EV charging in the frequency range 2-150 kHz (supraharmonics).  
National Taiwan University of Science and Technology,  
Taipeh, Taiwan, 13.03.2023.

J. Meyer:

Power Quality Challenges of Large Scale Integration of Electric Vehicles in distribution networks.  
National Chung Cheng University ,  
Chiayi, Taiwan, 17.03.2023.

J. Meyer:

Energy Efficiency versus Power Quality (Challenges Related to Modern Power Electronics in Low Voltage Networks).  
23rd International Conference on Electric Power Engineering (EPE),  
Brno, Czech Republic, 24.05.2023.

J. Meyer:

Measurement of harmonic network impedance in transmission systems.  
IEEE PES General Meeting 2023,  
Orlando, USA, 18.07.2023.

J. Meyer:

Power Quality challenges that new technologies bring to distribution grids of the future.  
Bernard Price Memorial Lecture,  
Johannesburg und Durban, Südafrika, 12.-13.09.2023.

J. Meyer:

Challenges related to harmonics and supraharmonics in future power systems (from a German perspective).  
Workshop on Power Quality Challenges in New Type Power Systems,  
Hangzhou, China, 15.11.2023.

J. Meyer:

Power Quality challenges related to new technologies for the distribution grid of the future.  
XI Simposio Internacional Sobre Calidad De La Energía Eléctrica,  
Valledupar, Kolumbien, 01.11.2023.

R. Stiegler:

Frequenzabhängige Netzimpedanz und Resonanzen.  
6. Fachtagung Netzurückwirkungen,  
Dresden, 21.09.2023.

## Veröffentlichungen

C. Garzon, A. Pavas, A. M. Blanco, J. Meyer:

Potential Use of Fryze's Approach-Based Power Theories in Waveform Distortion Contribution Assessment.

Simposio Internacional sobre Calidad de la Energía Eléctrica - SICEL 2023, Valledupar, 02.11.2023.

M. Bruhns, K. Wenzlaff, P. Schegner:

Parameter Identification of electric arc models for free burning high-current fault arcs.

23rd International Conference on Gas Discharges and their Applications (GD 2023), Greifswald, 10.-15.09.2023.

J. Ullmer, M. Bruhns, P. Schegner:

Applicability of Methods for Short circuit current Calculation in Electrolysis systems.

IEEE Power and Energy Student Summit (IEEE PESS 2023),

Bielefeld, 15.-17.11.2023.

M. Domagk, J. Meyer, K. Scheida, R. Braunstein, E. Traxler, R. Zoll:

Impact of Discontinuous Measurements on the Trend Analysis of Power Quality Parameters.

27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023),

Rome, Italy, 12.-15.06.2023.

A. Bracale, P. Caramia, P. De Falco, M. Domagk, J. Meyer:

Probabilistic Forecasting of Current Harmonic Distortions in Distribution Systems.

IEEE PES ISGT EUROPE 2023,

Grenoble, France, 23.-26.10.2023.

R. Adam, C. Hildmann, M. Hemken, K. Backhaus, S. Rupp:

Research of components for an increase of transmission capacity in distribution grids by changing existing ac links into dc links.

27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023),

Rome, Italy, 12.-15.06.2023.

C. Jäschke, M. Beyer, L. Schinke, J. Seifert, P. Schegner:

Power output of magnetocaloric materials during heat and cold decoupling by unidirectional fluid flow.

International Journal of Refrigeration,

2023.

S. Kannan, J. Meyer, P. Schegner:

Continuous non-invasive resonance detection in residential low voltage networks.  
27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023),  
Rome, Italy, 12.-15.06.2023.

S. Kannan, J. Meyer, P. Schegner:

Assessment of technical feasibility of non-invasive measurement of grid-side harmonic impedance in low-voltage networks.  
27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023),  
Rome, Italy, 12.-15.06.2023.

E. Kaufhold, S. Müller, J. Meyer, J. Myrzik, P. Schegner:

Impact of DC power on the small signal characteristics of single-phase photovoltaic inverters in frequency domain.  
2023 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP),  
Terrasini, Italy, 2023.

E. Kaufhold, J. Meyer, J. Myrzik, P. Schegner:

Harmonic Stability Assessment of Commercially Available Single-Phase Photovoltaic Inverters Considering Operating-Point Dependencies.  
Solar. Vol. 3. No. 3. MDPI,  
2023.

E. Kaufhold, S. Müller, J. Meyer, J. Myrzik and P. Schegner:

Scalability of Harmonic Emission Generated by Single-phase Photovoltaic Inverters.  
2023 IEEE 14th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG),  
Shanghai, China, 2023.

E. Kaufhold, J. Meyer, J. Myrzik, P. Schegner:

Framework to assess the stable operation of commercially available single-phase inverters for photovoltaic applications in public low voltage networks.  
21th International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'23),  
Madrid, Spain, 24.-26.05.2023.

A. Gallarreta, I. Fernández, D. Ritzmann, S. Lodetti, V. Khokhlov, D. De La Vega, P. Wright, J. Meyer:

Statistical relationship between RMS and QP spectra of voltage measurements in the 9–150 kHz range.  
Electric Power Systems Research,  
2023.

V. Khokhlov, F. Möller, J. Meyer, P. Schegner:  
Adverse Impact of Harmonic and Interharmonic Supply Voltage Distortion on Mass-Market Electrical Appliances.  
IEEE Open Access Journal of Power and Energy,  
2023.

S. Lodetti, A. Gallarreta, D. Ritzmann, V. Khokhlov, P. Wright, J. Meyer, I. Fernández, D. Vega:  
On the suitability of the CISPR 16 method for measuring conducted emissions in the 2–150kHz range in low voltage grids.  
Electric Power Systems Research,  
2023.

V. Khokhlov, S. Lodetti, I. Fernández, R. Stiegler, P. Davis, J. González-Ramos, J. Meyer, P. Wright, A. Gallarreta, D. De La Vega:  
Impedance Characteristics at Socket Outlets in Residential and Commercial Buildings in the Frequency Range 2-150 kHz.  
27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023),  
Rome, Italy, 12.-15.06.2023.

S. Krahmer, S. Ecklebe, P. Schegner, K. Röbenack:  
Zur Notwendigkeit von Stabilitätsbetrachtungen von Umrichterinteraktionen bei der Sicherheitsbewertung in Verteilnetzen.  
at - Automatisierungstechnik, Band 71, Heft 12,  
2023.

J. Schmitt, S. Ecklebe, S. Krahmer, K. Röbenack, P. Schegner:  
An extended stability criterion for grids with Q(V)-controlled distributed energy resources.  
IEEE Power and Energy Student Summit (IEEE PESS 2023),  
Bielefeld, 15.-17.11.2023.

C. Liebermann, L. Gnärig, R. Weiß, A. Hoffmann, Y. Zhang, R. Herrmann, P. Schegner, S. Bernet:  
Current Limiting of Virtual Synchronous Machines on Unbalanced Faults Considering Grid Protection.  
Power and Energy Student Summit & Power Electronics Student Summit 2022,  
Kassel, 2023.

C. Liebermann, P. Schegner:  
Auswirkungen ungünstig verdrahter Leitungen - Optimierung der Verdrillung während der Planung.  
23. Dresdner Kreis Elektroenergieversorgung,  
Magdeburg, 2023.

L. Ma, M. Schmidt, P. Schegner:

Assessment of the significance of features for the identification of domestic appliances.  
27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023),  
Rome, Italy, 12.-15.06.2023.

T. Hudač, J. Drapela, L. Kukačka, J. Meyer, R. Stiegler:

Survey on LED lamps for residential applications: characterization of performance.  
2023 23rd International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE),  
Brno, Czech Republic, 24.-26.05.2023.

A. Bosovic, H. Renner, A. Abart, E. Traxler, J. Meyer, F. Möller, M. Music:

Modelling of voltage unbalance in large real medium voltage distribution networks.  
27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023),  
Rome, Italy, 12.-15.06.2023.

G. Singh, J. Meyer, J. Grappe, T. Murphy:

Applicability of IEC derived voltage unbalance limits in the US power system: a case study.  
27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023),  
Rome, Italy, 12.-15.06.2023.

R. Langella, J. Drapela, M. Halpin, J. Meyer, D. Mueller, H. Sharma, A. Testa, N. R. Watson, D. Zech:

New interharmonic subgroup concept for quantifying and limiting distortion in distribution networks: further developments and experimental validation.  
27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023),  
Rome, Italy, 12.-15.06.2023.

J. E. Caicedo, E. Rivas, J. Meyer:

Comparison of transformations and feature extraction techniques to characterize fault-induced voltage sags.  
Revista UIS Ingenierías. Vol 22, No 4,  
Bucaramanga, Colombia, 22.09.2023.

L. Kukačka, J. Hergesel, J. Bílek, M. Vik, J. Meyer, R. Stiegler, J. DRÁPELA:

Comparison of Procedures for Measuring the Temporal Contrast Sensitivity Function.  
2023 IEEE Sustainable Smart Lighting World Conference & Expo,  
Mumbai, India, 08.-10.06.2023.

A. Gallarreta, I. Fernández, D. Ritzmann, S. Lodetti, V. Khokhlov, J. Meyer, P. Wright, D. de la Vega:  
Techniques to Generate Test Waveforms for Power Grid Measurement Methods up to 150 kHz.  
27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023),  
Rome, Italy, 12.-15.06.2023.

S. Müller, J. Meyer, J. Jacob:  
Modeling and Simulation of the Impact of a Fast Charging Infrastructure on Harmonic Disturbance Levels.  
27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023),  
Rome, Italy, 12.-15.06.2023.

M.S. Potyka, P. Schegner:  
Example Application of an Energy Management of Energy Resources in Industrial Facilities With Renewables.  
20th International Conference on Smart Technologies, EUROCON 2023,  
Turin, Italy, 06.-08.07.2023.

M. Pourarab, J. Meyer, O. Domianus, M. Ulrich, T. Naef, R. Rölli:  
Assessment of harmonic emission level of customer installations considering actual level of cancellation.  
27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023),  
Rome, Italy, 12.-15.06.2023.

F.M. Mwaniki, M. Pourarab, R. Stiegler, J. Meyer, D. Roggo, B. Evequoz:  
Reproducibility of network impedance measurements using single-frequency and broadband signal injection.  
IEEE 13th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS),  
Bern, Switzerland, 2023.

S. Rasti, P. Schegner:  
Designing a Cellular Energy System to optimize and use Multi-Energy Flexibility.  
ETG Congress 2023,  
Kassel, 25.-26.05.2023.

S. Rasti, F. Flatter, H. Kramer:  
Generic Technology Models To Simulate Flexible Operation In Multi-Energy Cellular Energy Systems.  
27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023),  
Rome, Italy, 12.-15.06.2023.

Y. Chen, E. Mohns, A. Mingotti, G. Crotti, P. Letizia, R. Stiegler, H. Üaye<sup>1</sup>, B. Ayhan, V. Munoz:  
Reference Measurement Systems for the Calibration of Instrument Transformers Under Power Quality Phenomena and their Uncertainties.  
2023 IEEE 13th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS),  
Bern, Switzerland, 27.-29.09.2023.

P. Letizia, G. Crotti, A. Mingotti, T. ROBERTO, Y. Chen, E. Mohns, M. Agazar, D. Istrate, B. Ayhan, H. Çayci, R. Stiegler:  
Characterization of Instrument Transformers under Realistic Conditions: Impact of Single and Combined Influence Quantities on Their Wideband Behavior.  
Sensors,  
2023.

R. Stiegler, J. Meyer, R. Dommerque, M. Nazemi, D. Scherbarth:  
Evaluation of Harmonic Transfer between Transmission and Distribution Network based on Measurements.  
27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023),  
Rome, Italy, 12.-15.06.2023.

## Lehrstuhl Hochspannungs- und Hochstromtechnik

### Forschungsschwerpunkte und Forschungsprojekte

Die Energiewende führt derzeit zum Wandel des Elektroenergieversorgungsnetzes. Neben der dezentralen Einspeisung elektrischer Energie insbesondere auf Ebene des Verteilnetzes werden zukünftig die zur Übertragung der elektrischen Leistung eingebauten Komponenten stärker belastet. Neue Anwendungsfelder elektrischer Komponenten in Systemen der elektrischen Mobilität führen zu neuen Anforderungen und Belastungsprofilen, die bei der Auslegung berücksichtigt werden müssen. Eine hohe Zuverlässigkeit und Sicherheit der Elektroenergieversorgung ist dabei gleichbleibend gefordert. Die Forschung auf dem Gebiet der Stromtragfähigkeit und Erwärmung, Hochspannungstechnik und den stromführenden Verbindungen ist dafür unerlässlich und stellt in der Gesamtheit ein absolutes Alleinstellungsmerkmal an der Professur für Hochspannungs- und Hochstromtechnik dar. Folgend werden die Schwerpunkte der Forschung in den einzelnen Fachgruppen vorgestellt.

### Elektrische Kontakte und Verbindungen

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

#### *Grundlagenforschung*

- Untersuchen der physikalischen Vorgänge der Alterung stromführender Verbindungen
- 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
- Erarbeiten von Grundlagen zur Lebensdauerprognose

#### *Angewandte Forschung*

- Qualifizieren neuer Werkstoffe für die Konstruktion von Verbindungen
- Weiterentwickeln, Betriebs- und Langzeitverhalten von Sicherungen
- Kontakt- und Langzeitverhalten von Verbindungen für konventionelle und Hochtemperatur-Freileitungsseile sowie Kabelgarnituren
- Betriebs- und Langzeitverhalten von Steckverbindungen mit federnden Kontaktelementen für Elektroenergieanlagen und die Elektromobilität
- Elektrische Eigenschaften umformtechnischer Verbindungen insbesondere für die Anwendung in der E-Mobilität
- Elektrisch-thermisches Verhalten von Verbindungen bei Belastung mit einem Kurzzeitstrom
- Weiterentwickeln von Konstruktionsrichtlinien und Verfahren für elektrische Alterungsprüfungen

## Hochspannungstechnik

Untersuchen von flüssigen, festen und gasförmigen Isolierstoffen:

### *Grundlagenforschung*

- Durch- und Überschlagsspannung von Isolierstoffen & deren Systemen
- Strom-Zeit-Verhalten von Isolierwerkstoffen und Systemen als Antwort auf impulsförmige, harmonische oder stete Spannungsbelastung
- Prüf- und Messtechnik zum exp. Erfassen physikalischer Größen
- Statistische Bewertung der physikalischen Prozesse
- Elektrische Feldstärkeverteilung unter Berücksichtigung von Raumladungen

### *Angewandte Forschung*

- Weiterentwickeln von Prüfanforderungen für Betriebsmittel der HGÜ
- Teilentladungsmessung bei Gleich- und Wechselspannung an gasisolierten Systemen und Kabelsystemen
- Untersuchung der Lebensdauer von Isoliersystemen rotierender Mittelspannungsmaschinen
- Einfluss hoher Frequenzen auf das dielektrische Verhalten von Nieder- und Mittelspannungsmaschinen
- Isoliersysteme elektrischer Maschinen für das hybrid-elektrische Fliegen
- Reinigen von Industrieabwässern mit hochfrequenten Entladungen

## Strombelastbarkeit und Erwärmung

Untersuchen der Strombelastbarkeit und Erwärmung elektrischer Betriebsmittel:

### *Grundlagenforschung*

- Wärmequellen / -übertragung 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 Elektroenergie-technik
- Dimensionieren der Leiterquerschnitte von Hochstromanlagen
- Optimieren der Anordnung von Leitern z. B. in Armaturen
- Rechnerischer Nachweis der Erwärmung von Energieverteileranlagen und Bordnetzen / -komponenten
- Koppeln der Methoden und Werkzeuge zum Berechnen der Wärmeübertragung und Optimieren von Wärmeflüssen

## Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Elektrische Kontakte und Verbindungen“



Lukas Büttner, Dipl.-Ing.

**Langzeitverhalten von Ganzbereichssicherungen für die Anwendung in Photovoltaikanlagen**

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages  
FKZ: ZF4272802LT9

Ganzbereichssicherungen schützen elektrische Anlagen bereits seit Jahrzehnten kostengünstig und effizient vor Fehlerströmen. Geänderte Belastungsprofile, hervorgerufen durch verteilte Energieerzeugung wie beispielsweise Photovoltaik (PV)-Anlagen, haben einen signifikanten Einfluss auf das Langzeitverhalten der Sicherungen. Dabei kann eine Alterung des Schmelzleiters innerhalb der geforderten Lebensdauer das Unterbrechungsverhalten und damit den Schutzbereich der Sicherung verändern. Deshalb wurden Untersuchungen zum Langzeitverhalten an optimierten Schmelzleitern von Ganzbereichssicherungen bei hohen thermischen Belastungen für bis zu 4000 h durchgeführt (Bild 1). Diese wurden bei einer konstanten Temperatur von 180 °C, 200 °C und 220 °C im Wärmeschrank und bei einer Belastung mit einem Gleichstrom, der eine konstante Temperatur am Lot auf dem Schmelzleiter von bis zu 200 °C erzeugte, durchgeführt.

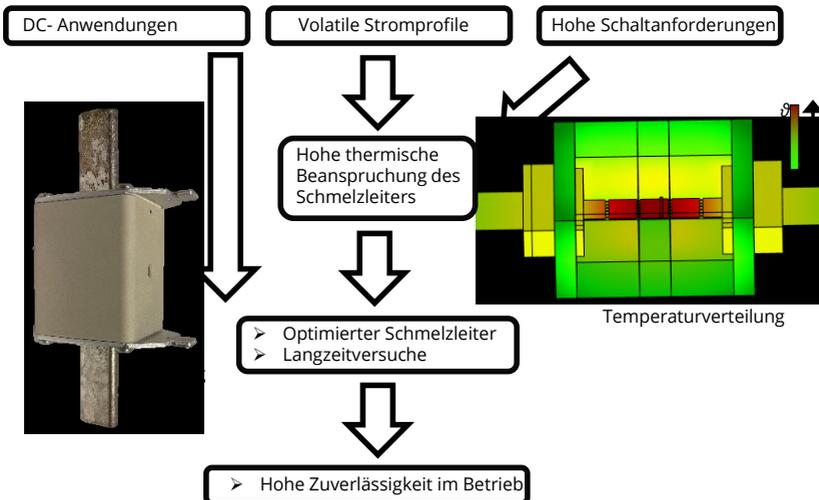


Bild 1: Erhöhte Anforderungen an Sicherungen zur Anwendung in Photovoltaik-Anlagen

Der Gleichstrom wurde so geregelt, dass sich eine konstante Temperatur am Lot von 200 °C des Schmelzleiters einstellte. Aufgrund des volatilen Stroms einer Photovoltaik-Anlage wur-

den zusätzlich zyklische Stromprofile untersucht. Es wurden Schmelzleiter einerseits bei Belastung mit zyklischem Gleichstrom als auch bei rein thermischer zyklischer Wechsellast in einem verfahrenbaren Ofen thermisch beansprucht. Dabei wurde jeweils eine maximale Temperatur am Lot von 200 °C erreicht. Durch die Auslagerung bei hohen Temperaturen bildeten sich zwischen dem Lot und dem Schmelzleiter intermetallische Phasen (Bild 2). Je höher die thermische Belastung war, desto dickere Phasen bildeten sich.

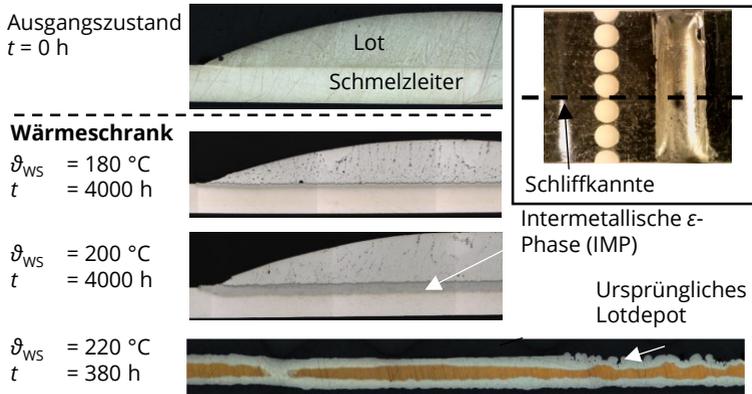


Bild 2: Schliffbilder von Schmelzleitern vor und nach der Alterung bei hohen Temperaturen

Nach den Langzeitversuchen wurden Unterbrechungsversuche an den Schmelzleitern bei Überströmen durchgeführt. Dadurch konnte der Einfluss der Alterung auf das Unterbrechungsverhalten der jeweiligen Typen von Schmelzleitern näher betrachtet werden. Bei den Schmelzleitern, die eine optimierte Geometrie hatten und bei Temperaturen  $\leq 200 \text{ °C}$  gealtert wurden, konnte kein Einfluss auf das Unterbrechungsverhalten bei Überströmen festgestellt werden [1]. Schmelzleiter die bei einer Temperatur von 220 °C gealtert wurden, alterten deutlich, da sich das Lot entlang des Schmelzleiter verteilte. Das Unterbrechungsverhalten dieser Schmelzleiter änderte sich nach einer Belastung bei 220 °C für 380 h. Anhand dieser Untersuchungen konnte ein zuverlässiges Unterbrechungsverhalten des Schmelzleiters nach einer konstanten Langzeitbelastung bei Temperaturen am Lot von  $\leq 200 \text{ °C}$  für 4000 h ermittelt werden. Es konnte kein Einfluss der bei 200 °C gebildeten intermetallischen Phasen auf das Unterbrechungsverhalten von Siberschmelzleitern mit Zinnlot festgestellt werden. Auch konnte kein Einfluss von zyklischen thermischen Lasten auf das Unterbrechungsverhalten im Bereich des Lotdepots festgestellt werden.

Ein Einfluss von thermomechanischen Wechsellasten auf das Langzeitverhalten von Schmelzleitern wurde jedoch in diesen Untersuchungen nicht weiter betrachtet. Speziell deren Einfluss auf die Engstellen des Schmelzleiters sollte in zukünftigen Arbeiten genauer untersucht werden.

[1] Büttner, L.; Hildmann, C.; Lippold, M.; Schlegel, S.: Optimized low voltage power fuses for current requirements in low voltage power grids. In: *Cired 2023 International Conference & Exhibition on Electricity Distribution*. Rom, Italien, 2023.



**Markus Gödicke, Dipl.-Ing.**

**Untersuchungen zum Einfluss von  
Werkstoff und Geometrie auf das  
Langzeitbetriebsverhalten von  
Pressverbindungen mit mehrdrätigen  
Leitern**

Der zuverlässige und sichere Transport elektrischer Leistung hat in den Verteilnetzen höchste Priorität. Diese Anforderungen werden gleichermaßen durch langzeitstabile stromführende Verbindungen gewährleistet, die innerhalb des Verteilnetzes eingesetzt werden. Darüber hinaus sollen diese Verbindungen wirtschaftlich ausgelegt werden bei gleichzeitig optimalem Kontakt- und Betriebsverhalten. Dazu wird der Einfluss von Material und Geometrie auf das elektrische und thermische Kontakt- und Langzeitverhalten von Pressverbindungen mit mehrdrätigen Leitern untersucht. Für die Versuche wird ein mehrdrätiger Leiter aus einer bisher nicht in der Kabeltechnik eingesetzten Aluminiumlegierung mit einem Querschnitt von 240 mm<sup>2</sup> verwendet. Nachdem im ersten Schritt des Projektes das Kontaktverhalten von Pressverbindungen mit diesem Leiter für verschiedene Werkstoffe und Geometrien der Verbinderhülse untersucht wurde, steht im nächsten Projektschritt das Langzeitverhalten ausgewählter Verbindungen im Vordergrund. In den Versuchen zum Kontaktverhalten zeigte sich, dass der Werkstoff EN AW-6060 (AlMgSi) die beste Kombination aus Umformverhalten und elektrischem Kontaktverhalten bietet. Aus diesem Grund wurde dieser Werkstoff für die Verbinder in den Langzeitversuchen ausgewählt. Für die Untersuchung des Langzeitbetriebsverhaltens werden die geometrischen Kenngrößen der Verbindungen variiert, dazu zählen der Kompressionsfaktor, der Passungsfaktor, die Rillung der Innenseite der Pressverbinderhülse oder die Länge des Pressbereichs (Bild 1).

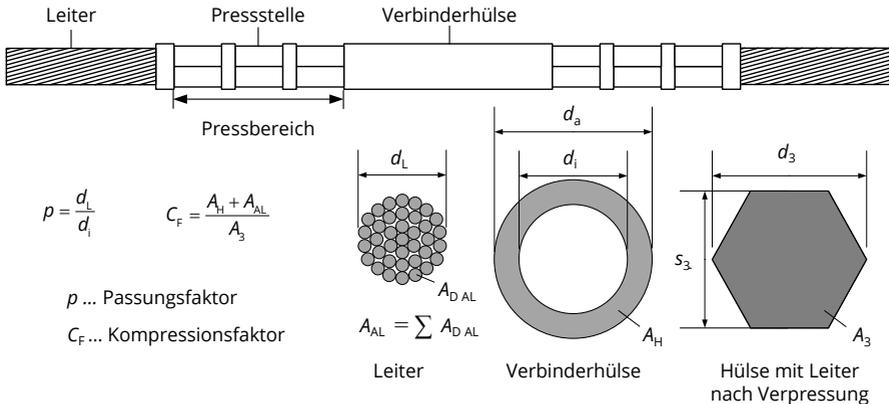


Bild 1: Schematische Abbildung der Verbinder die in den Langzeitversuchen eingesetzt werden

Die Verbindungen werden in einem stromdurchflossenen Langzeitversuch unter Laborbedingungen thermisch beansprucht. Insgesamt werden drei Stromkreise aufgebaut. Jeder

Stromkreis enthält einen Referenzleiter, welcher der zum Einstellen der Belastung verwendet wird (Bild 2). Der Strom, der in den jeweiligen Prüfkreis eingespeist wird, wird durch eine Regelung so nachgeführt, dass die Temperatur des Referenzleiters einen konstanten Wert von 90 °C mit einer Toleranz von 5 K annimmt.

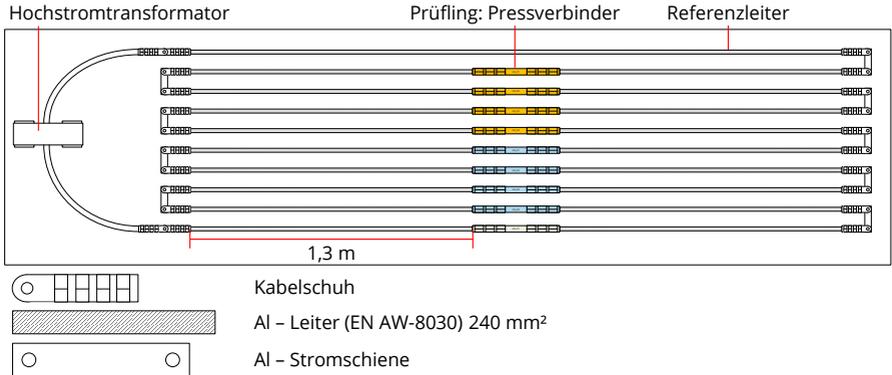


Bild 2: Schematische Abbildung eines Prüfkreises der Langzeitversuche

Die Temperatur der eingesetzten Prüflinge wird mit Thermoelementen Typ T während des Betriebs aller 60 s gemessen. Zusätzlich erfolgen zyklische Widerstandsmessungen, am abgeschalteten Stromkreis bei Raumtemperatur. Für die Widerstandsmessung wird die Vier-Leiter-Messmethode verwendet. Zu Beginn der Untersuchungen wurden die Anfangsgütefaktoren der Verbindungen bestimmt (Bild 3).

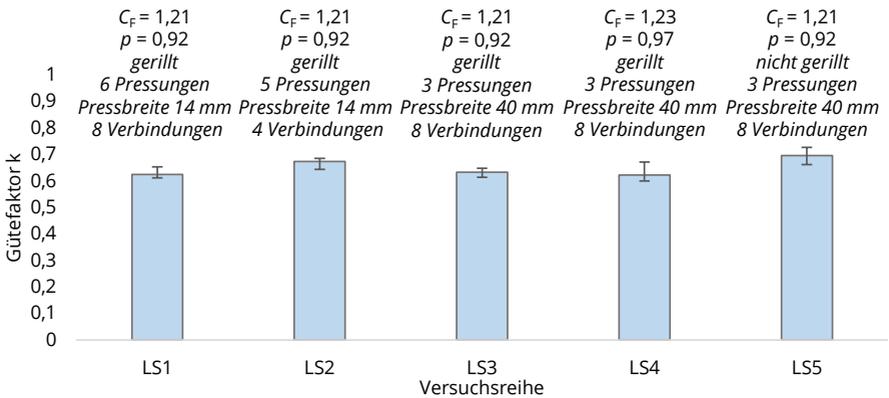


Bild 3: Anfangsgütefaktoren der Verbindungen, die in den Langzeitversuchen eingesetzt werden

Die Anfangsgütefaktoren der unterschiedlichen Verbindungen liegen in einem ähnlichen Bereich von 0,6 bis 0,7. Damit ist davon auszugehen, dass die Verbindungen im Vergleich zum verwendeten Leiter in den Versuchen zunächst als Wärmesenken wirken. Im Lauf der Versuche ist nun der Einfluss der elektrisch-thermischen Belastung auf das Langzeitverhalten der Verbindungen zu untersuchen.



**Christian Hildmann, Dr.-Ing.**

**Untersuchung zu Sauerstoffdichtheit stromführender Schraubenverbindungen mit bimetallicen Kontaktpartnern**

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium für Bildung und Forschung

FKZ: 03HY117E



Leitprojekt H<sub>2</sub>Giga

Das Langzeitverhalten stromführender Bimetall-Verbindungen kann von der Oxidation bestimmt werden, wenn die Kontaktebene bzw. die Mikrokontakte nicht gasdicht sind. Beispielsweise wurde die Wirkung des Eindringens von Sauerstoff in die Verbindung in vergleichenden experimentellen Untersuchungen in normaler atmosphärischer Luft sowie in Inertgas-Atmosphäre nachgewiesen [1]. Bei bestimmten untersuchten Werkstoffkombinationen sowie Belastungsbedingungen war das Langzeitverhalten der betreffenden stromführenden Verbindungen teils stark stochastisch. Gasdichtheit bedeutet, dass eine Diffusion von Luftmolekülen innerhalb der Kontaktebene sowie mikroskopisch in den Kontaktpunkten nicht möglich ist. In [1] wurden bereits unterschiedliche Modellvorstellungen für das Entstehen von Gasdichtheit zusammengetragen und verglichen. Ein möglicher Ansatz ist dabei die Perkolationstheorie [2], mit der ggf. die makroskopische Diffusion von Gasmolekülen in der Kontaktebene beschrieben werden kann. Grundlegend wird dabei angenommen, dass in zwei- und dreidimensionalen Strukturen, die nur aus einem geometrischen Grundelement (z. B. Kreise, Dreiecke, Kugeln) gebildet werden, abgeschlossene Bereiche entstehen können. Dies ist der Fall, wenn eine gewisse Mindest-Besetzung in den Strukturen gegeben ist. In stromführenden Verbindungen entspräche dies einem Mindestanteil der mechanisch tragenden Kontaktfläche an der scheinbaren Kontaktfläche. Auf dieser Basis kann eine mittlere mechanische Spannung in der Kontaktebene berechnet werden, die den Annahmen der Perkolationstheorie für eine dreidimensionale Struktur genügt. Zielstellung war entsprechend, das elektrische Langzeitverhalten stromführender Schraubenverbindungen mit Kontaktpartnern aus Kupfer und Aluminiumlegierung bei definierten mittleren mechanischen Spannungen im Druckkegel zu untersuchen (Tabelle 1).

Tabelle 1: Anzahl der stromführenden Schraubenverbindungen gefügt mit definierter mittlerer mechanischer Spannung und jeweiligen Fügeelementen (OFF - Unterlegscheibe kleine Reihe; MFF - Spannscheibe & große Unterlegscheibe; DP - Druckplatte) bei der Belastungstemperatur  $\vartheta_v$

Werkstoffe	$\vartheta_v$ $\sigma_m$ in N/mm <sup>2</sup>	90 °C			105 °C		
		OFF	MFF	DP	OFF	MFF	DP
AlMgSi0,5/ Cu-ETP	20		10				
	50	5	5	5			
	80		5	5		5	5

Die stromführenden Schraubenverbindungen mit unterschiedlichen Fügeelementen wurden bei 90 °C und 105 °C stromlos im Wärmeschrank gelagert. Die Verbindungswiderstände wurden zyklisch mit einem Mikroohmmeter gemessen und daraus der Gütefaktor berechnet. Die Verbindungskräfte wurden an den M12-Schrauben unterschiedlicher Festigkeitsklassen aus der mit einem Ultraschalllängenmessgerät ermittelten Dehnung berechnet und mit der jeweiligen Ersatzquerschnittsfläche die mittlere mechanische Spannung bestimmt.

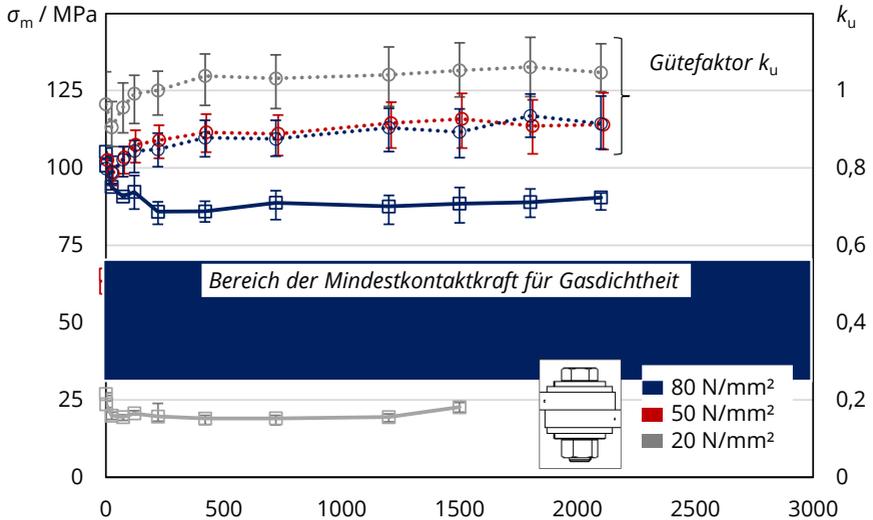


Bild 1: Verlauf der Verbindungskräfte und Gütefaktoren von Schraubenverbindungen mit je einer Stromschiene (40 mm x 10 mm) aus Kupfer und Aluminiumlegierung

Es zeigte sich, dass in den ersten ~ 2000 h der Versuchszeit die eingestellten mittleren mechanischen Spannungen durch die verwendeten federnden Fügeelemente in guter Näherung konstant gehalten werden konnten. Bei geringen Kontaktkräften ist die Messunsicherheit der gemessenen Schraubendehnung und damit die Streuung der ermittelten Kontaktkräfte teils hoch und das Erhöhen der mittleren Kontaktkraft vorrangig darauf zurückzuführen. Des Weiteren erhöhten sich bisher die Gütefaktoren der untersuchten Schraubenverbindungen nur wenig. In der gleichen Versuchszeit hatten Schraubenverbindungen vergleichbarer Versuchsreihen aus [1] bereits deutlich höhere Gütefaktoren. Da bislang die Gütefaktoren der mit einer mittleren mechanischen Spannung von 20 N/mm<sup>2</sup> montierten Verbindungen, die geringer als die mit der Perkolationstheorie abgeschätzten mechanischen Mindestspannung war, stabil waren, bestätigt sich die Annahme, dass gasdichte Cluster ein stabiles Langzeitverhalten ermöglichen, bislang nicht.

- [1] M. Oberst, „Einfluss von Sauerstoff auf die Alterung stromführender Bimetall-Verbindungen“, Dissertation, TU Dresden, 2020.
- [2] H. Scher und R. Zallen, „Critical Density in Percolation Processes,“ The Journal of chemical Physics, Nr. 53, New York, Juni 1970.



**Max Huter, Dipl.-Ing.**

**Ressourcenschonende, stromleitende  
Verbindungen für die Energiewende  
(Ampere-Clinch)**



Die Elektrifizierung setzt sich im Verkehrsbereich zunehmend durch. Zeitgleich kommt es weltweit zu einem stetig steigenden Bedarf von Elektroenergie, die den Ausbau des Energieversorgungssystems erfordert. Dies führt global zu einem hohen Bedarf an Leiterwerkstoffen und damit zu deren Verknappung und Verteuerung. Um beidem entgegenzuwirken, ist es wichtig, auch im Energiesektor durch die Verwendung von recycelten Materialien (Sekundär-Werkstoffe) einen Stoffkreislauf zu etablieren. Neben diesem Stoffkreislauf spielt der verstärkte Einsatz von Aluminium und ressourceneffiziente Fügeverfahren eine wichtige Rolle um vorhandene Ressourcen effizienter zu nutzen. Ein derzeit z. B. in der Automobilindustrie häufig eingesetztes ressourcenschonendes Fügeverfahren, das Widerstandsschweißen, kann nicht allen aktuellen Anforderungen gerecht werden. Beim Widerstandsschweißen ist zum einen ein hoher Energieaufwand nötig und zum anderen können unterschiedliche Werkstoffe nur mit großem Aufwand gefügt werden. Um für jeden Anwendungsfall eine Verbindung mit optimalen Eigenschaften herstellen zu können, werden daher vermehrt alternative Fügeverfahren genutzt, um stromführende Leiter miteinander zu verbinden. Insbesondere das Clinchen ist eine vielversprechende Füge-technik (Bild 1), da es nicht nur das sichere Fügen unterschiedlicher Werkstoffkombinationen ermöglicht, sondern auch ohne thermischen Eintrag sowie Fügeelemente auskommt.

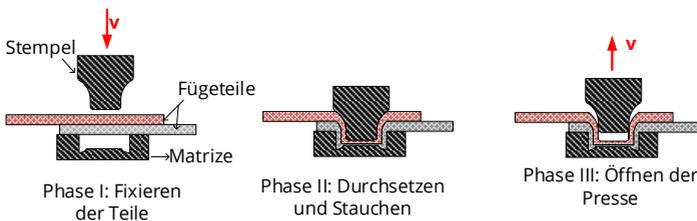


Bild 1: Verfahrensablauf des Clinchens mit geschlossener Matrize

Beim Fügen von Leiterwerkstoffen sind neben den mechanischen Eigenschaften auch die elektrischen Eigenschaften einer stromführenden Verbindung von Bedeutung. Somit besteht die Herausforderung beim Clinchen darin, eine mechanisch stabile Verbindung mit geringem Verbindungswiderstand herzustellen. Der Clinchprozess muss reproduzierbar einzustellen sein und die Eigenschaften der Verbindung müssen über die gesamte Lebensdauer sichergestellt werden. Ein möglichst geringer elektrischer Widerstand lässt sich dabei nachweislich durch optimiert eingestellte Prozessparameter beim Fügen herstellen. Gerade bei der Nutzung von sekundären Rohstoffen ist zu klären, inwieweit die Clinchbarkeit eine

systematische Abhängigkeit zur Werkstoffhistorie zeigt, da gerade bei Aluminiumlegierungen geringe Änderungen in der chemischen Zusammensetzung einen signifikanten Einfluss auf die Eigenschaften der Werkstoffe haben. Neben dieser Fragestellung ist mit Untersuchungen der Ermüdungsfestigkeit zu klären, wie sich die Clinchverbindungen hinsichtlich struktureller Integrität und Beständigkeit der elektrischen Eigenschaften bei einer zyklischen mechanischen Belastung verhalten. Diese wiederkehrenden mechanischen Belastungen treten beispielsweise durch Motoren und Transformatoren auf, welche sinusförmige Vibrationen erzeugen oder durch Relais als Quelle für impulsartige Stöße [2]. Daher wird im Projekt „Ressourcenschonende, stromleitende Verbindungen für die Energiewende“ sowohl die zyklische Festigkeit der betrachteten Grundwerkstoffe in Abhängigkeit der Verformungszustände sowie Ermüdungsversuche an Clinchverbindungen durchgeführt. Experimentell werden diese zyklisch mechanisch belastet in einer hydraulischen Prüfmaschine untersucht (Bild 2).

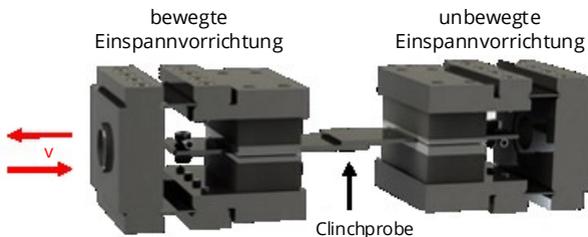


Bild 2: Einspannvorrichtung des hydraulischen Versuchsstandes für die Untersuchung der Ermüdungsfestigkeit von Clinchproben

Die Versuche werden anschließend mit mechanischen und elektrischen Bewertungsgrößen sowie analytisch ausgewertet. Der Einfluss der Clinchgeometrie und der Werkstoffe auf die mechanische Stabilität und die elektrische Leitfähigkeit sowie die elektrischen und mechanischen Alterungsmechanismen sollen dabei genauer charakterisiert werden. Ziel des Projektes ist es somit, ein einfach anwendbares Betriebsfestigkeitskonzept zu erstellen, mit dem eine zuverlässige Bewertung der Fügeverbindung bei kombinierter mechanisch-elektrischer Belastung möglich ist. Dieses Bewertungskonzept soll es ermöglichen, die mechanische und elektrische Lebensdauer einer Clinchverbindung unter zyklischen Belastungen abschätzen zu können.

- [1] Kalich, J. u. Füssel, U.: Influence of the Production Process on the Binding Mechanism of Clinched Aluminum Steel Mixed Compounds. Journal of Manufacturing and Materials Processing 5 (2021) 4, S. 105.
- [2] Hartung, M.: Verfahren zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und Verlängerung der Lebensdauer elektronischer Baugruppen durch dynamische Belastungsreduzierung während des Betriebs. Rostock, 2017.



**Michelle Pomsel, Dipl.-Ing.**

**Untersuchungen zur Temperaturverteilung in Steckverbindungen im Drehstromsystem bei kurzzeitiger Strombelastung**

Der Ausbau erneuerbarer Energiequellen und der Elektromobilität führt zu veränderten Anforderungen für elektrische Betriebsmittel. Insbesondere Steckverbindungen für Hochstromanwendungen müssen gegenüber bisherigen Anwendungen steigenden Nenn- und Kurzschlussströmen standhalten und gleichzeitig eine geringere Baugröße aufweisen. Die zuverlässige Kenntnis der Belastungsgrenzen dieser Komponenten ist entscheidend für einen sicheren und zuverlässigen Betrieb. Die Belastungsgrenzen der Steckverbindungen mit Kurzzeitstrom werden durch aufwändige Messungen in Laborversuchen mit einphasigen Anordnungen ermittelt. In der Praxis werden diese Steckverbindungen jedoch gleichermaßen in Drehstromsystemen eingesetzt. Die Beanspruchung in dieser Konfiguration kann sich zu der in einphasigen Anwendungen unterscheiden. Insbesondere der Proximity-Effekt im Drehstromsystem führt zu einer im Kontaktelement inhomogenen Stromdichteverteilung, die zu einer zusätzlichen lokalen Erwärmung bzw. einer unsymmetrischen mechanischen Belastung führen kann [1], [2].

Aufgrund der komplexen Geometrien der Kontaktelemente und Leiter ist eine analytische Berechnung der Stromdichteverteilung mit vertretbarem Aufwand nicht möglich. Für diesen Zweck wurde ein elektrisch-thermisches Finite-Elemente-Methode (FEM)-Modell erarbeitet. Die Berechnung der Erwärmung erfolgt ergänzend oder möglicherweise alternativ zu aufwändigen Kurzschlussversuchen, um die Kurzschlussfestigkeit der Steckverbindungen im Drehstromsystem nachzuweisen.

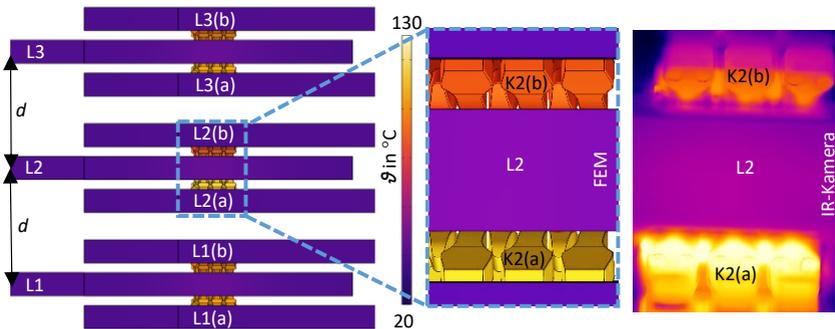


Bild 1: Temperaturverteilung in den drei Leitern des Drehstromsystems zum Zeitpunkt  $t_t = 3$  s bei Belastung mit  $I_p = 5,8$  kA für  $t_t = 3$  s, in der Simulation (FEM) und im Experiment (IR-Kamera)

Es werden die drei Leiter des Drehstromsystems abgebildet. Jeder Leiter enthält jeweils einen Gabelsteckverbinder mit zwei Kontaktelementen. Der Aufbau wurde speziell entwickelt um Temperaturdifferenzen in den Kontaktelementen zu erzeugen. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass eine ungleichmäßige thermische Beanspruchung in Steckverbindungen im Drehstromsystem auftreten kann. Generell ist der Unterschied der thermischen Beanspruchung zwischen den beiden Kontaktelementen eines Leiters am stärksten ausgeprägt für den Leiter L2 und am geringsten für den Leiter L1. Das dem Leiter L1 zugewandte Kontaktelement (a) erwärmt sich deutlich stärker als das dem Leiter L3 zugewandte Kontaktelement (b) (Bild 1). Um das Modell abzugleichen, werden experimentelle Untersuchungen entsprechend der im FEM-Modell abgebildeten Belastungssituation durchgeführt. Diese thermischen Beanspruchungen können während kurzer Belastungszeiten im Sekundenbereich messtechnisch erfasst werden und stimmen gut mit den numerisch berechneten Temperaturen überein. Mit dem validierten FEM-Modell kann die Stromverteilung und die Erwärmung von Steckverbindungen in dreiphasige Anwendungen präzise berechnet werden. Aus vorherigen Untersuchungen ist bekannt, dass die asymmetrische Stromverteilung im Drehstromsystem durch einen vergrößerten Leitermittenabstand reduziert werden kann [1]. Um diese Abhängigkeit sowohl modellhaft als auch in den experimentellen Untersuchungen zu betrachten, wurde der mit dieser Versuchsanordnung minimal mögliche Leitermittenabstand von 0,05 m mit einem Leitermittenabstand von bis zu 0,5 m verglichen (Bild 2).

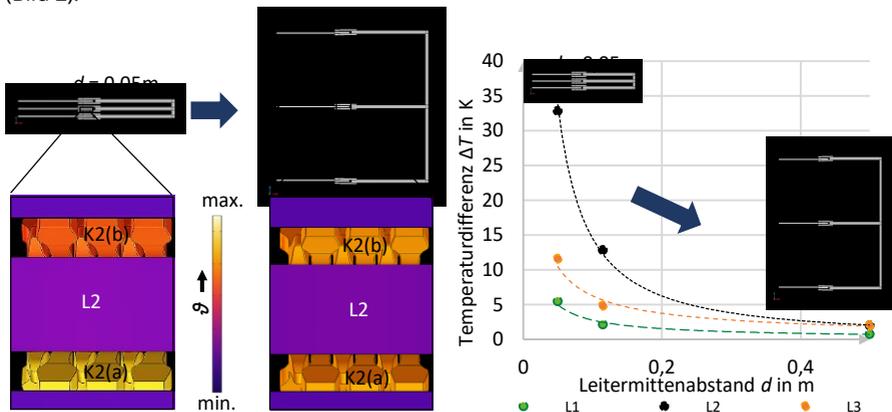


Bild 2: Numerisch berechnete Temperaturverteilung zum Zeitpunkt  $t_t = 3$  s bei technisch minimal möglichem Leitermittenabstand (links) und vergrößertem Leitermittenabstand  $a = 0,5$  m (rechts)

Wie erwartet homogenisiert ein größerer Leitermittenabstand die Temperaturverteilung in den Kontaktelementen zwischen den Leitern der verschiedenen Phasen.

- [1] Michelle Pomsel, „Electromagnetic Modelling of Current Density Distribution in Power Plug-In Connectors“, gehalten auf der ICEC, Sapporo, 2022.
- [2] X. Guan u. a., „Transient current distribution and force analysis of three phase enclosure type GIB based on field-circuit coupling FEM method“, Applied Computational Electromagnetic Society J, Bd. 30, S. 1223-1231, 2015.



**Moritz Ullrich, Dipl.-Ing.**

**Systemtechnik für die Erzeugung von grünem Wasserstoff**

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium für Bildung und Forschung



Leitprojekt H<sub>2</sub>Giga

In der nationalen Wasserstoffstrategie der Bundesrepublik Deutschland wird für das Jahr 2030 eine Elektrolyse-Kapazität von mindestens 10 Gigawatt angestrebt [1]. Um dieses Ziel zu erreichen, sollen im Rahmen des Leitprojektes H2Giga die technologischen Rahmenbedingungen für die industrielle Fertigung von Elektrolyseanlagen insbesondere für grünen Wasserstoff geschaffen werden. Der Energiebedarf von Elektrolyseanlagen im Megawatt-Bereich kann im Betrieb nur mit Dauerströmen im Kiloampere-Bereich gedeckt werden. Diese können in Kombination mit der gekapselten Bauweise der Anlagen Temperaturen von bis zu 180 °C an Strombahnen und stromführenden Verbindungen zur Folge haben. Dadurch entstehen neue Herausforderungen im Bereich des Langzeitverhaltens dieser. Folgend wird als Teilaspekt des Projekts *HyLeiT* die Strombelastbarkeit stromführender Schraubenverbindungen mit unterschiedlichen Kontaktwerkstoffen untersucht. Es werden Werkstoffkombinationen wie Aluminium - Aluminium betrachtet, für die bei niedrigeren Einsatztemperaturen ein langzeitstabiler Betrieb bereits nachgewiesen wurde und laserstrukturierte Oberflächen betrachtet. Mit insgesamt elf unterschiedlichen Werkstoff- und Oberflächenkombinationen wird eine große Bandbreite an möglichen Schraubenverbindungen analysiert (Tabelle 1).

Tabelle 1: Grund- und Beschichtungswerkstoffe sowie Einsatztemperatur bei Langzeitbelastung

Grundwerkstoff	Beschichtungswerkstoff	Einsatztemperatur
E-AlMgSi0,5	blank, verzinkt, spritzverkupfert	(140...180) °C
Cu-ETP R240	blank, verzinkt mit Kontaktelement blank & laserstrukturiert, verzinkt, vernickelt	(140...160) °C

Die Forschungsinhalte gliedern sich in die folgenden Arbeitsschritte (Bild 1):

- (1.1) Analyse der Kontaktoberflächen vor dem Verschrauben mit 3D-Mikroskop
- (1.2) Aufbau der Schraubenverbindungen in Stromkreisen für eine Belastungsdauer von mindestens 10.000 Stunden bei Verbindungstemperaturen von (140...180) °C
- (1.3) *Ausgehend:* Analyse der Kontaktoberflächen nach der Langzeitbelastung mittels 3D-Mikroskop und Schlibfbildern
- (2) Untersuchungen zur Sauerstoffdichtheit von Schraubenverbindungen mit und ohne Kontaktpaste

**Elektrisches Langzeitverhalten bei Dauerbelastung:**

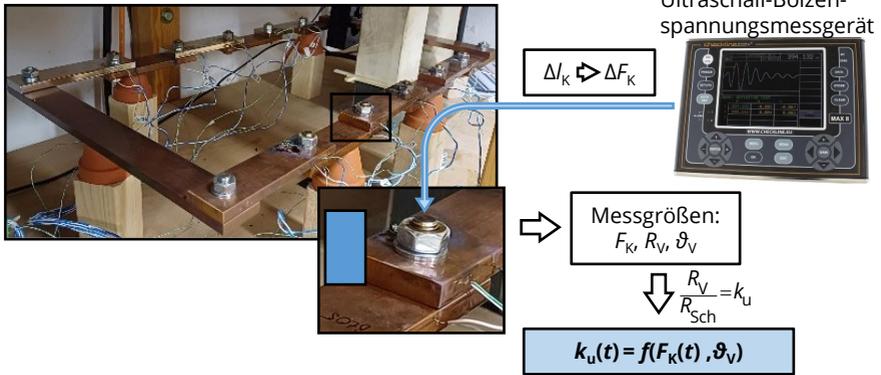
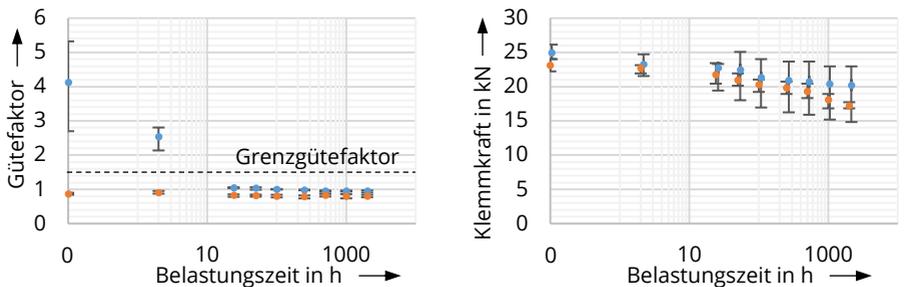


Bild 1: Vorgehen zur Analyse des Langzeitverhaltens der Schraubenverbindungen

Das elektrische Langzeitverhalten der Verbindungen wird anhand der Presskraft, des Verbindungswiderstandes und der Verbindungstemperatur beurteilt. Der thermisch induzierte Kraftabbau der Schraube wird mittels Ultraschall-Bolzenspannungsmessgerät gemessen. In Kombination mit dem zeitlichen Verlauf des Gütefaktors ist eine Prognose der Langzeitstabilität der Verbindung über die gewünschte Lebensdauer der Elektrolyseure möglich. Erste Ergebnisse zeigen, dass die Aussagekraft des Gütefaktors zum Anfangszeitpunkt der Belastung über das Langzeitverhalten begrenzt ist (Bild 2). Zum jetzigen Stand liegt die Belastungsdauer der Verbindungen bei etwa 3.000 Stunden.



● Al, blank – Al, blank (180 °C) ● Cu, blank & laserstruk. – Cu, blank & laserstruk. (140 °C)  
 Bild 2: Zeitlicher Verlauf des Gütefaktors und der Klemmkraft für ausgewählte Verbindungen

[1] *Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie*, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Jul 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bmwf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230726-fortschreibung-nws.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bmwf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230726-fortschreibung-nws.pdf?__blob=publicationFile&v=1)

## Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Hochspannungstechnik“



Andreas Dowbysch, M.Sc.

**Reproduzierbares Zünden einer Kugelfunkenstrecke für die Prüfung von Gleichspannungsbetriebsmitteln**

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

FKZ: 03EI6010

Um den sicheren Betrieb von Hochspannungsbetriebsmitteln über Jahrzehnte zu gewährleisten, werden diese thermischen, mechanischen und dielektrischen Prüfungen unterzogen. Für die dielektrischen Tests ist eine Belastung mit Gleich-, Wechsel- und Stoßspannung üblich. Zusätzlich werden die Komponenten der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) aufgrund von Effekten wie dem kapazitiv-resistiven Feldübergang oder der Akkumulation von Raumladungen mit sogenannten zusammengesetzten Spannungen geprüft. Zusammengesetzte Spannungen werden durch das Zusammenschalten zweier Hochspannungsprüfanlagen über Schutz- und Koppellemente (Schutzelement) erzeugt. Diese sollen die spannungserzeugenden Anlagen vor der Spannung der jeweils anderen Anlage schützen und gleichzeitig beide Spannungen unbeeinflusst auf den Prüfling einkoppeln. Für die Überlagerung von Gleich- und Stoßspannungen eignet sich unter anderem ein hochohmiger Widerstand auf der Gleichspannungsseite und eine Kugelfunkenstrecke (KFS) auf der Stoßspannungsseite als Schutzelement. Jedoch hat die KFS einen Einfluss auf die Stoß- und zusammengesetzte Spannung. Ein maßgeblicher Grund hierfür ist, dass die Zündspannung der KFS  $U_{KFS}$  innerhalb einer Messreihe bei sonst identischer Einstellung variieren kann (Bild 1).

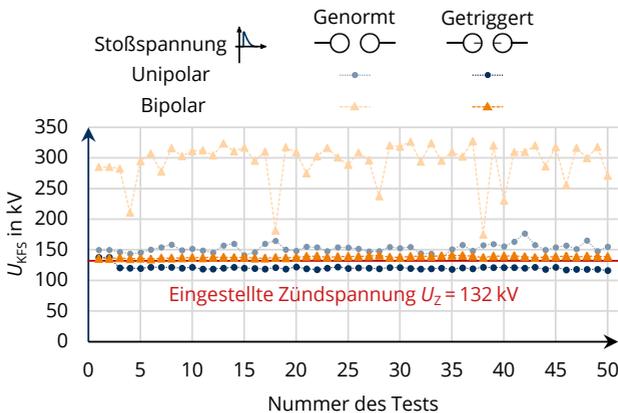


Bild 1: Zündspannung  $U_{KFS}$  einer genormten und einer getriggerten Kugelfunkenstrecke für uni- und bipolare Überlagerung von Stoßspannung und positiver Gleichspannung (nach [1])

Die unipolaren Überlagerungen mit einer genormten KFS zeigen konstante Zündspannungen der KFS  $U_{KFS}$ , die nur leicht oberhalb der eingestellten Zündspannung  $U_Z$  liegen. Für die bipolare Überlagerung können die Zündspannungen der KFS  $U_{KFS}$  jedoch bis zum 2,5-fachen der eingestellten Zündspannung  $U_Z$  betragen. Grund hierfür ist das Fehlen eines geeigneten Startelektrons für den Durchschlagprozess der KFS (Bild 2).

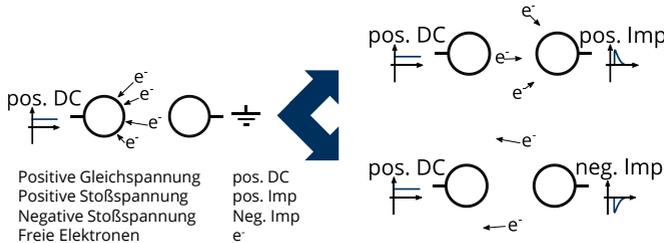


Bild 2: Bewegung der freien Elektronen bei positiver Gleichspannungsbelastung und Überlagerung mit Stoßspannung (nach [1])

So ist vor dem Durchzünden des Stoßspannungsgenerators (SG) eine Kugel der KFS mit Gleichspannung belastet und die andere über das Widerstandsnetzwerk des SG geerdet. Hierdurch werden die in der Umgebung der KFS befindlichen freien Elektronen  $e^-$  in Richtung der positiv geladenen Kugel beschleunigt und teilweise durch sie abgeleitet. Wird nun eine positive Stoßspannung überlagert, so ist zu einem bestimmten Zeitpunkt die andere Kugel positiver geladen als die mit Gleichspannung belastete. Die freien Elektronen  $e^-$  werden in Richtung der stoßspannungsseitigen Kugel beschleunigt und stehen als Startelektronen zur Verfügung. Es kommt zum Durchzünden der KFS. Dahingegen werden sie bei Überlagerung mit negativer Stoßspannung weiter in Richtung der mit Gleichspannung belasteten Kugel beschleunigt und zusätzlich, durch das negative Potential der stoßspannungsseitigen Kugel, aus der Umgebung der KFS verdrängt. Somit entsteht bei der bipolaren Überlagerung ein Mangel an freien (Start-) Elektronen. Hierdurch zündet die KFS später im Spannungsverlauf der bipolar überlagerten negativen Stoßspannung. Daraus resultiert eine höhere Zündspannung der KFS  $U_{KFS}$ . Aus diesen Überlegungen ergibt sich, dass durch die Bereitstellung von Elektronen das Zünden der KFS verbessert und damit die Zündspannung der KFS  $U_{KFS}$  verringert werden kann. Eine Möglichkeit zur Bereitstellung von Elektronen ist die forcierte Triggerung der KFS. Hierbei werden durch einen Funken freie Ladungsträger in der Elektrodenstrecke generiert. So zeigt sich ebenfalls im Bild 1 eine deutliche Verringerung der Zündspannungen der KFS  $U_{KFS}$  über die Messreihen hinweg für die beidseitige getriggerte KFS. Die Zündspannungen für unipolare und bipolare Überlagerung sind bei dieser Variante nahezu konstant und liegen im Bereich der eingestellten Zündspannung. Somit lässt sich mit der getriggerten KFS die Reproduzierbarkeit der zusammengesetzten Spannungsverläufe deutlich verbessern. Dabei sind auch andere Quellen für freie Ladungsträger, wie z. B. eine Teilentladungsquelle in der Nähe der Elektrodenstrecke, denkbar.

[1] A. Dowbysch, T. Götz and S. Schlegel, "Generation of Reproducible HVDC-Impulse Composite Voltage Waveforms Using a Triggered Spherical Spark Gap," VDE High Voltage Technology; 4. ETG-Symposium, Berlin, Germany, 2022, pp. 1-6.

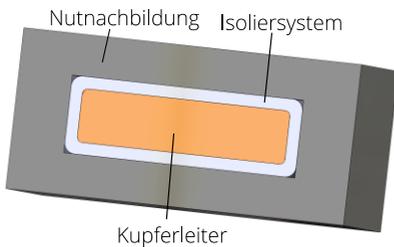


**Lena Elsaß, Dipl.-Ing.**

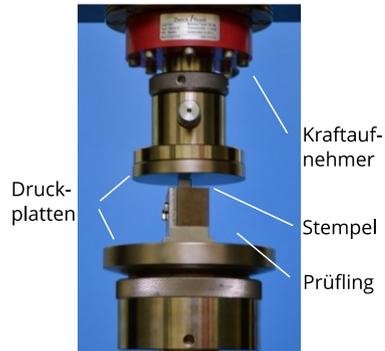
**Thermomechanische Belastung von Isoliersystemen rotierender Hochspannungsmotoren: Verhalten unter Scherspannung**



Rotierende Hochspannungsmaschinen finden als Generatoren und Motoren Anwendung in der Energie- und Antriebstechnik. Eine gängige Fertigungsmethode des Isoliersystems dieser Hochspannungsmaschinen ist das Imprägnieren des gesamten Stators mittels Ganztränktechnik, sodass eine stoffschlüssige Verbindung zwischen Kupferleiter, Isoliersystem und Statorblechpaket entsteht [1]. Das bietet den Vorteil hoher mechanischer Stabilität und guter Wärmeleitfähigkeit. Herausfordernd ist die stoffschlüssige Verbindung bei relativen Längenänderungen zwischen Kupferleiter und Statorblechpaket, die im Betrieb auftreten [1]. Insbesondere Motoranläufe mit Vielfachen des Nennstromes führen zu einer starken Erwärmung und somit Ausdehnung des Kupferleiters, wohingegen sich das Statorblechpaket in dieser kurzen Zeit kaum erwärmt und ausdehnt. Die Konsequenz sind thermomechanische Scherspannungen im Isoliersystem, die zu Delaminationen und Fehlstellen führen können. Um eine Reduktion der Lebensdauer zu verhindern, werden verschiedene Isoliersystemvarianten unter Scherspannungsbelastung hinsichtlich ihrer Wirksamkeit als Optimierungsmaßnahme untersucht. Für die Untersuchung werden Prüflinge bestehend aus Kupferleiter, Isoliersystem und Nutnachbildung genutzt. Der gesamte Prüfling wird globalgetränkt, sodass die zu untersuchende stoffschlüssige Verbindung zwischen den verschiedenen Komponenten entsteht. Um eine Scherspannung in dem Isoliersystem zu erzeugen, wird mithilfe einer Zug-Druck-Maschine der Kupferleiter weggesteuert gegenüber der Nutnachbildung deplatziert (Bild 1).



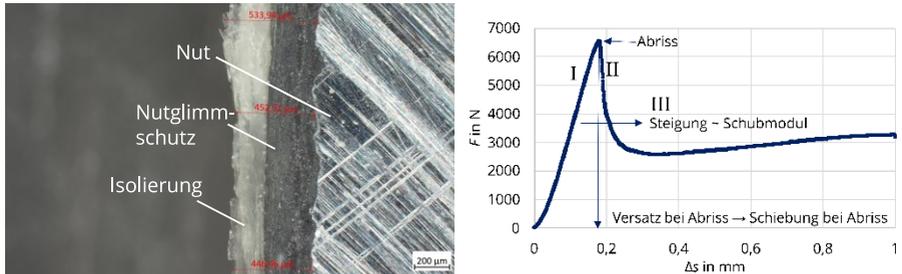
(a) Prinzipbild des Prüflings



(b) Prüfling in Zug-Druck-Maschine

Bild 1: Prüfling und Versuchsaufbau für die Replikation thermomechanischer Scherspannungen

Als Konsequenz der zunehmenden Scherspannung reißt das Isoliersystem. Die genaue Position des Risses kann mithilfe eines Mikroskops bestimmt werden (Bild 2 (a)).



(a) Mikroskopaufnahme (Schnitt) des Prüflings

(b) Kraft-Weg-Verlauf eines Ausdrückversuches

Bild 2: Auswertungsmethoden der Ausdrückversuche

Weiterhin kann mithilfe des Kraft-Weg-Verlaufs das mechanische Verhalten des Isoliersystems analysiert werden (Bild 2 (b)): Der erste Anstieg (I) stellt die elastische Verformung des Isoliersystems dar. Mit steigendem Weg und somit Versatz zwischen Kupferleiter und Nutnachbildung erhöht sich die Kraft, sodass zunehmende Scherspannungen im Isoliersystem auftreten. Der Anstieg des linearen ersten Teilbereiches ist proportional zum Schubmodul  $G$  des jeweiligen Isoliersystems und kann aus den Messwerten bestimmt werden.

Die anschließende starke Reduktion der Kraft bei weiter steigendem Weg (II) indiziert einen Riss des Isoliersystems. Über den Versatz bei Abriss  $\Delta s_{\text{riss}}$  und die Dicke der Isolierung  $d_{\text{iso}}$  kann die Schiebung bei Abriss  $\gamma_{\text{riss}}$  ermittelt werden:

$$\gamma_{\text{riss}} = \arctan\left(\frac{\Delta s_{\text{riss}}}{d_{\text{iso}}}\right) \quad (1)$$

Der letzte Abschnitt des Verlaufes (III) nach der Kraftreduktion gibt Aufschluss über das Gleit- und Haftverhalten des gerissenen Prüflings. Ein horizontaler Verlauf indiziert reines Gleiten zwischen den gerissenen Schichten, wohingegen eine Steigung Haftanteile anzeigt. Die Parameter Schubmodul  $G$  und Schiebung bei Abriss  $\gamma_{\text{riss}}$  ebenso wie die Position des Abrisses innerhalb des Isoliersystems dienen der vergleichenden Evaluation verschiedener Optimierungsmaßnahmen, die das Ziel haben, den Abriss an elektrisch unkritischen Stellen zu lenken.

Im Rahmen der Untersuchung werden verschiedene Isoliersystemvarianten bei Raumtemperatur verglichen. Die erfolgversprechenden Varianten werden anschließend bei erhöhter Temperatur untersucht.

[1] G. C. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert and H. Dhirani, Electrical Insulation for Rotating Machines, Wiley, 2004



**Johannes Hoffmann, M.Sc.**

**Untersuchungen am Isoliersystem  
hybrid-elektrischer Flugantriebssysteme**

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Im Jahr 2021 stieß die Luftfahrt insgesamt 720 Mt CO<sup>2</sup> aus [1]. Um diese zu eliminieren, hat die Europäische Union die emissionsneutrale Luftfahrt zum Jahr 2050 als Ziel gesetzt. Ein erster Schritt auf dem Weg zu diesem Ziel ist die Entwicklung elektrisch betriebener Flugzeuge mit einer Passagierkapazität bis 19 Personen für den regionalen Luftverkehr. Bei der Realisierung dieses Vorhabens spielen leichte, effiziente und robuste Subsysteme wie Generator, Elektromotor, Umrichter und Leitungselektronik eine zentrale Rolle. Das Projekt fokussiert sich hierbei auf vollelektrische und hybrid-elektrische Antriebssysteme, bei denen der Vor- und Auftrieb mittels Elektromotoren gewährleistet wird. Da dem Gewicht in der Luftfahrt eine übergeordnete Rolle zukommt, ist eine hohe abgegebene Leistung pro Kilogramm gefordert und soll bis zum Jahr 2035 von den heute verfügbaren 5 kW/kg auf 25 kW/kg ansteigen [2]. Die Realisierung dieser Leistungsdichten lässt sich im Wesentlichen durch die Erhöhung der Betriebsspannung und Stromdichte realisieren. Die durch erhöhte Stromdichten hervorgerufenen Verluste des Leiters führen zu hohen Betriebstemperaturen bis zu 200 °C, die die Isoliermaterialien belasten. Da in der Luftfahrt der Ausfall von Antriebssystemen verheerende Folgen haben kann, liegt ein besonderes Augenmerk auf dem sicheren Betrieb solcher Systeme. Als Isoliermaterialien kommen Hochleistungspolymere wie z. B. PTFE, PEEK oder PFA zum Einsatz, um einen sicheren Betrieb bei erhöhten Temperaturen zu gewährleisten. Diese sind bisher nur selten als Isoliermaterial im Einsatz, weshalb es bisher kaum Betriebserfahrung mit diesen Materialien gibt.

Grundsätzlich sind die avisierten Isoliersysteme teilentladungsfrei (*Typ I Isoliersystem*) ausgelegt, um den hohen Betriebssicherheitsanforderungen gerecht zu werden. Der geringe Luftdruck auf Flughöhe beeinflusst dabei das Teilentladungsverhalten, insbesondere deren Einsetzspannung. Für den Auslegungsprozess ist es daher wichtig, die Teilentladungseinsetzspannung unter allen Betriebsbedingungen (z. B. hohe Temperatur, niedriger Luftdruck) zu kennen.

Die Messungen der Teilentladungseinsetzspannung bei verschiedenen Temperaturen und Luftdrücken wird experimentell an Prüflingen mit gewickelter Windungsisolierung untersucht (Bild 1). Die Leiter-Leiter-Konfiguration mit jeweils einem Leiter auf 1 kHz AC Hochspannungs(HS)- und Erdpotential ruft hohe elektrische Feldstärken im Berührungspunkt

(Tripel) hervor. Dort können in der umgebenen Luft Teilentladungen einsetzen. Die Einsetzspannung wird für drei Temperaturstufen bei Luftdrücken zwischen 200 mbar und 1000 mbar aufgenommen.

Die aufgenommenen Einsetzspannungen sind in Bild 2, normiert auf den maximalen Absolutwert, dargestellt. Sowohl die Temperatur als auch der Luftdruck beeinflussen die Einsetzspannung. Die höchste Einsetzspannung

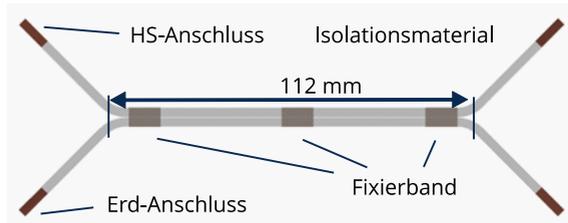
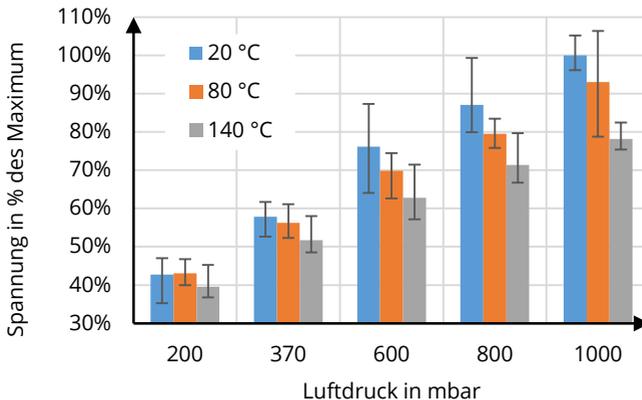


Bild 1: Leiter-Leiter Prüfling

wird für 20 °C und 1000 mbar (Normalbedingungen am Erdboden) gemessen und als Maximalwert (100 %) festgelegt. Der Einfluss des Luftdrucks kann zu einer Reduzierung der Einsetzspannung um ca. 60 % führen. Mit höherer Temperatur nimmt die Teilentladungseinsetzspannung weiter ab, wobei diese bei hohen Luftdrücken den größten Einfluss hat.

Basierend auf den Erkenntnissen kann in weiteren Untersuchungen ermittelt werden unter



welchen, im Flug auftretenden, Belastungen der Worst Case in Form der geringsten TE-Einsetzspannung eintritt. Weiterhin kann die Auswirkung des geringen Luftdrucks auf die schädigende Wirkung von Teilentladungen untersucht werden.

Bild 2: TE-Einsetzspannung bei geringem Luftdruck und erhöhter Temperatur

- [1] Europäische Kommission, Generaldirektion Mobilität und Verkehr, Generaldirektion Forschung und Innovation, Flightpath 2050: Europe's vision for aviation: maintaining global leadership and serving society's needs, Publications Office, 2011.
- [2] Clean Aviation: Power Trip: HASTECS energizes the path to hybrid-powered flight, <https://www.clean-aviation.eu>, [abgerufen: 30 Oktober 2023].



**Johanna Linke, Dipl.-Ing.**

**Teilentladungen in gasisolierten Systemen mit klimafreundlichen Isoliergasen**



Seit den 1960er Jahren wird in metallgekapselten gasisolierten Systemen (GIS) vorwiegend das Isoliergas Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ) eingesetzt. Aufgrund des hohen Treibhauspotentials des Gases von 24.300 [1] kommen seit einigen Jahren klimafreundlichere Isoliergase zum Einsatz. Eine effektive Alternative ist ein Isoliergasgemisch aus Fluornitril ( $\text{C}_4\text{-FN}$ ), Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ). Die Untersuchung alternativer Gase beinhaltet auch das Verhalten dieser bei möglichen Defekten in GIS wie festen Störstellen am Gehäuse. Eine wichtige Methodik zur Detektion dieser Fehlstellen ist die Messung von Teilentladungen (TE). Das TE-Verhalten kann zum Beispiel mit leitungsgebundenen, feldgebundenen oder optischen Messmethoden erfasst werden, um den Zustand des Isoliersystems zu bewerten. Zur Untersuchung des TE-Verhaltens wird ein Versuchsaufbau (Bild 1) bestehend aus einem Transformator (PEOI 350/500), einem kapazitiven Spannungsteiler ( $C_1, C_2$ ) zur Spannungsmessung und einer Sperrimpedanz ( $L_S = 120 \text{ mH}$ ), genutzt. Die Sperrimpedanz verhindert hochfrequente Einkopplungen in den Messkreis und das Abfließen der TE-Ströme in das Elektroenergienetz. Der Prüfgasraum mit der Elektrodenanordnung  $C_{\text{Test}}$  wird mit dem klimafreundlichen Gasgemisch bei einem Druck von  $0,35 \text{ MPa}_{\text{abs}}$  gefüllt. Die Messungen erfolgen bei 3,5-facher TE-Einsatzspannung ( $3,5 \hat{U}$ ).

Die verwendete Elektrodenanordnung (Bild 2) besteht aus einer Kugelelektrode auf Erdpotential. Die Gegenelektrode bildet eine Platte auf Hochspannungspotential. Der Homogenitätsgrad von  $\eta = 0,52$  modelliert das typische, schwach inhomogene Feld eines GIS. Durch das Einbringen einer Nadelspitze auf Erdpotential wird ein gestörtes, schwach inhomogenes Feld erzeugt. Die Stahlnadel ist über einen PTFE-Adapter, der für die Messung des TE-Stroms ( $I_{TE}$ ) erforderlich ist, mit der Kugelelektrode verbunden und hat einen Spitzenradius von  $r \approx 22 \text{ }\mu\text{m}$  und eine Länge von  $l = 5 \text{ mm}$ . Der Elektrodenabstand beträgt  $d = 60 \text{ mm}$ .

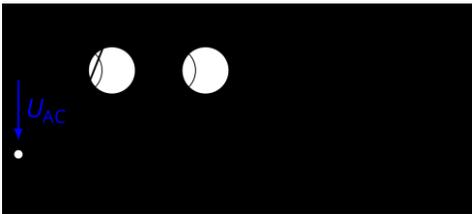


Bild 1: Ersatzschaltbild Hochspannungskreis

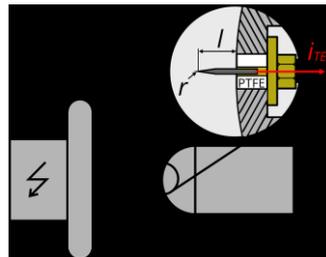


Bild 2: Elektrodenanordnung [2]

Ein Oszilloskop mit einer Bandbreite von 3,5 GHz wird verwendet, um die TE-Ereignisse zeit-synchron mit verschiedenen Methoden zu messen. Die TE-Strommessung direkt an der Nadelspitze erfolgt über einen externen, breitbandigen 50- $\Omega$ -Widerstand. Optische TE-Signale werden mit einem Fotovervielfacher im Spektralbereich von (230 ... 700) nm gemessen. Die Messung der Wechsellspannung ermöglicht den Phasenbezug der TE-Signale. Dieser ist notwendig, da die TE-Messergebnisse eine starke Polaritatsabhangigkeit aufweisen.

**Positive Spitze:** Sowohl in der TE-Strommessung als auch bei der optischen Messung treten Entladungen mit sehr hohen Amplituden zwischen dem Spannungsmaximum und dem Nulldurchgang auf. Die Differenz der Impulsamplituden zwischen steigender und fallender Flanke ist jedoch bei den optischen Signalen weniger stark als bei der TE-Strommessung. Dies lasst darauf schließen, dass impulslose Signale im TE-Strom in der steigenden Flanke signifikante optische Entladungen hervorrufen (Bild 2 (a)). [3]

**Negative Spitze:** Bei sehr hohen Spannungen treten im TE-Strom Impulsentladungen mit Amplituden von etwa 0,1 bis 0,2 mA in der steigenden Flanke auf. Gleichzeitig erzeugen impulslose Entladungen im Maximum der Halbwelle einen impulslosen Strom. Dieser geht mit optischen Signalen von bis zu 1 mA einher, welche mit dem Fotovervielfacher gemessen werden (Bild 2 (b)). [3]

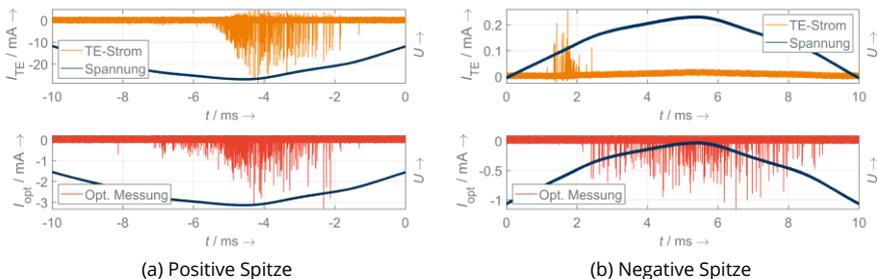


Bild 2: TE-Strom und optische Signale bei 3,5  $U_i$

Ursache für das Auftreten des impulslosen Stromes an der negativen Spitze ist die Akkumulation von Raumladungen vor der Spitze. Insbesondere bei kleineren Spannungen treten Lawinenentladungen in Form von Trichelimpulsen auf. Bei höheren Spannungen wird die Raumladungswolke zu klein, um Einzelimpulse zu erzeugen, sodass sich ein impulsloser Strom ausbildet. An der positiven Spitze führt die Raumladungsakkumulation in der fallenden Flanke zu starken Entladungen in Richtung Elektrode. [3]

- [1] C. Smith, Z.R.J. Nicholls et al, "The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity Supplementary Material", Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on CC, Genf 2021
- [2] T. Götz, H. Kirchner, K. Backhaus "Partial Discharge Behaviour of a Protrusion in Gas-Insulated Systems Under DC Voltage Stress", MDPI Energies 13.12, 2020
- [3] J. Linke, T. Götz, U. Riechert et al, "Partial discharge behaviour in GIS with fluoronitriles: analysis of pressure dependence and PD measurement methods", International Symposium of High Voltage Engineering (ISH), 2023



**Thomas Linde, Dipl.-Ing.**  
**Auswirkungen harmonisch verzerrter Spannungen auf die Teilentladungsalterung**

Die Flexibilisierung elektrischer Energieübertragungsnetze führt zur stärkeren Durchdringung mit umrichterbasierten Technologien, wie z. B. umrichtergesteuerter Antriebe oder leistungselektronischer Transformatoren. Die hohen Schaltfrequenzen und Flankensteilheiten moderner Halbleiterschalter, welche in Zukunft durch Wide-Bandgap-Halbleitertechnologien weiterhin zunehmen, können zu höherfrequenten Überlagerungen der 50 oder 60-Hz-Netzspannung führen [1]. Die resultierenden harmonisch verzerrten Spannungen verringern die Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Isoliersystemen [2]. Neben zusätzlichen dielektrischen Verlusten durch die höherfrequenten Komponenten der Spannung ändert sich auch das Teilentladungsverhalten von Isoliersystemen im Vergleich zu rein sinusförmiger Spannung. Eine mögliche Ursache dafür ist der Einfluss der Harmonischen auf die Höhe und den Zeitverlauf der Spannungsänderung ( $du/dt$ ). Harmonisch verzerrte Spannungen haben Auswirkungen auf die Teilentladungsmuster und -parameter (Bild 1 und 2) [3], sodass naheliegt, dass auch Alterungsprozesse durch Teilentladungen beeinflusst werden. Das Ziel der Untersuchungen ist demnach durch systematisches Einstellen verschiedener Parameter der verzerrten Spannungsform wie z. B. Total Harmonic Distortion (THD) oder die Ordnung der Harmonischen  $h$ , den genauen Einfluss auf die Lebensdauer von Isolierstoffproben bei Teilentladungsalterung zu quantifizieren.

Dabei kommt für die experimentellen Untersuchungen eine Modellanordnung bestehend aus einer Kugel-Platte-Anordnung (Bild 3) zum Einsatz. Auf der Oberfläche der  $23\ \mu\text{m}$  dicken, zwischengelegten Polyethylenterephthalat (PET)-Folie werden ladungsstarke Gleitentladungen hervorgerufen, die zur Schädigung der Isolierstoffprobe führen.

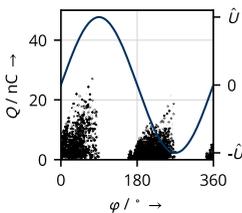


Bild 1: Gemessenes Teilentladungsmuster bei rein sinusförmiger 50-Hz-Wechselspannung

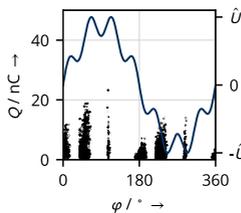


Bild 2: Gemessenes Teilentladungsmuster bei harmonisch verzerrter Spannung (Überlagerte siebte Harmonische mit THD = 20 %)

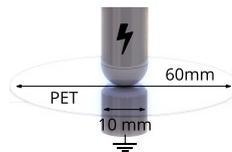


Bild 3: Elektrodenanordnung zur Erzeugung von Gleitentladungen auf PET-Folienprüflingen

Die Versuche werden in einer Klimakammer bei  $23 \pm 0.5$  °C und  $30 \pm 3$  % relative Luftfeuchte durchgeführt. Jeweils zehn PET-Folien werden zum Durchschlag bei drei Spannungsstufen  $\hat{U} = (3000 \dots 4000$  V) gebracht. Die aufgenommenen Lebensdauerwerte werden mit einer Weibullverteilung approximiert und deren 63 % Quantil ausgewertet.

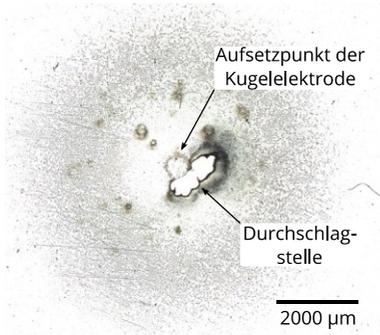


Bild 4: Mikroskopische Aufnahme der Durchschlagstelle und der Entladungsspuren ringförmig um die Kugelelektrode

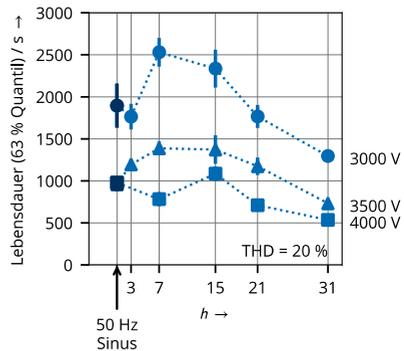


Bild 5: 63 % Quantil und 95 % Konfidenzbereich der approximierten Weibullverteilung für die gemessene Lebensdauer der PET-Folie in Abhängigkeit der harmonischen Ordnung

Die Teilentladungen führen zu einer deutlichen Schädigung der PET-Folie im Bereich um die kugelförmige Hochspannungselektrode (Bild 4). Die Stelle des Durchschlages ist in unmittelbarer Nähe zur Kugelelektrode, wo die elektrische Feldstärke am höchsten ist. Allgemein ergeben die Messungen, dass die verschiedenen harmonischen Überlagerungen einen individuellen Einfluss auf die Lebensdauer der Folie haben (Bild 5). Für kleine harmonische Ordnungen  $h$  erhöht sich die Lebensdauer zum Teil, was mit den unterschiedlichen Auswirkungen der Harmonischen die verschiedenen Teilentladungsparameter begründbar ist. Eine sinkende Tendenz ist erst ab einer harmonischen Verzerrung mit  $h > 15$  erkennbar. Im nächsten Schritt werden die Teilentladungsparametermessungen [3] mit den hier gezeigten Lebensdaueruntersuchungen korreliert, um die Auswirkungen der Harmonischen auf das Teilentladungsverhalten besser nachvollziehen zu können.

- [1] S. K. Rönnerberg et al., "On waveform distortion in the frequency range of 2 kHz-150 kHz-Review and research challenges," *Electric Power Systems Research*, vol. 150, 2017, doi: 10.1016/j.epsr.2017.04.032.
- [2] B. Florkowska, M. Florkowski, and P. Zydron, "The Role of Harmonic Components on Partial Discharge Mechanism and Degradation Processes in Epoxy Resin Insulation," in *International Conference on Solid Dielectrics*, Winchester, UK, 2007. doi: 10.1109/ICSD.2007.4290875.
- [3] T. Linde and S. Schlegel, "Effects of Harmonic Voltage Distortion on Partial Discharge Characteristics on Polymeric Insulation Foil," in *VDE High Voltage Technology*; 4. ETG-Symposium, Nov. 2022.



**Johanna Pietzonka, Dipl.-Ing.**

**Einfluss des Verlaufs einer zusammengesetzten Prüfspannung auf die elektrische Festigkeit von Schwefelhexafluorid**

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

FKZ: 03EI6010

In der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) belasten zusätzlich zu Gleichspannungen Stoßspannungen gasisolierte Systeme. Deshalb empfiehlt die CIGRE beispielsweise für gasisolierte Systeme der HGÜ das elektrische Prüfen mit zusammengesetzten Spannungen entsprechend der DIN EN 60060-1 [1] [2]. Eine zusammengesetzte Spannung entsteht aus der Überlagerung zweier Prüfspannungen. Diese werden dabei in voneinander getrennten Prüfspannungsquellen erzeugt. Sogenannte Koppellemente (KE) realisieren die Überlagerung der Prüfspannungen. Die Blockkapazität und die Kugelfunkstrecke haben sich als Koppellemente für Gleich- mit Stoßspannungen durchgesetzt. Die zusammengesetzten Spannungsverläufe mittels Kugelfunkenstrecke und mittels Blockkapazität sind jedoch nicht identisch. [1]

Daher wird untersucht, ob und welchen Einfluss die unterschiedlichen Spannungsverläufe auf die Durchschlagspannung einer Schwefelhexafluorid(SF<sub>6</sub>)-Isolierstrecke haben.

Der Einfluss der Koppellemente Blockkapazität und Kugelfunkenstrecke wird dazu an typischen schwach und stark inhomogenen Anordnungen im Isoliergas SF<sub>6</sub> ermittelt (Bild 1). Die Belastung erfolgt mit zusammengesetzten Spannungen aus Gleich- (DC) und Schaltstoß- bzw. aus Gleich- und Blitzstoßspannungen. Die Überlagerung zur zusammengesetzten Spannung kann hierbei unipolar (vorzeichenleich) oder bipolar (vorzeichenungleich) stattfinden.

Als Ergebnis werden die ermittelten Durchschlagspannungen in Abhängigkeit der genannten Koppellemente miteinander verglichen.

Die Prüfstrecke befindet sich in einer gasisolierten Kammer (GIS) (Versuchsaufbau, Bild 2) und wird an der stärker gekrümmten Elektrode mit zusammengesetzter Spannung belastet. Die Gegenelektrode liegt auf Erdpotenzial. Die über der Prüfstrecke anliegende Spannung misst ein Universalteiler. Als Gleichspannungsquelle dient eine dreistufige Greinacherkaskade. Die Gleichspannung wird mittels ohmschen Spannungsteilers bestimmt. Ein hochohmiger Wasserwiderstand (KE 1, Bild 2) koppelt die Gleichspannung auf die Prüfstrecke ein. Die Stoßspannung wird durch die unteren sechs Stufen des Stoßspannungsgenerators bereitgestellt und mit Hilfe eines kapazitiven Teilers gemessen. Ist die Blockkapazität

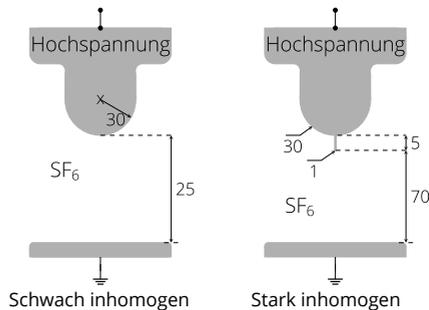


Bild 1: Prüfanordnungen in der GIS, Maße in mm

als Koppellement im Einsatz (KE 2a, Bild 2), schließen Drähte die Kugelfunkenstrecke kurz. Ist hingegen die Kugelfunkenstrecke (KE 2b, Bild 2) im Einsatz, so werden die oberen sechs Stufen des Stoßspannungsgenerators kurzgeschlossen.

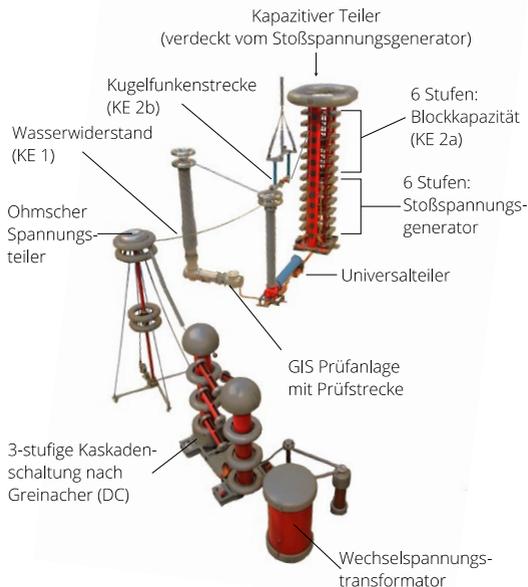


Bild 2: Versuchsaufbau, Erzeugung zusammengesetzter Spannungen aus Gleich- und Stoßspannung

Die Ergebnisse belegen die Unabhängigkeit der Durchschlagspannung bei Belastung mit zusammengesetzter Spannung aus Gleich- überlagert mit **Schaltstoß**spannung vom eingesetzten Koppellement. Die Ergebnisse der schwach inhomogenen Prüfstrecke zeigen ebenso die Unabhängigkeit der Durchschlagspannung vom Koppellement für die Belastung mit **unipolar** überlagert Gleich- und **Blitzstoß**spannung. Hingegen senkt die Kugelfunkenstrecke bei **bipolarer** zusammengesetzter Spannung aus Gleich- und **Blitzstoß**spannung die Durchschlagspannung in der schwach inhomogenen Prüfstrecke ab.

Zusammengefasst können die Koppellemente Blockkapazität und Kugelfunkenstrecke für das elektrische Prüfen zusammengesetzter Spannungen aus Gleich- und Schaltstoßspannung äquivalent eingesetzt werden. Für das elektrische Prüfen bei Belastung mit zusammengesetzter Spannung aus Gleich- und Blitzstoßspannung stellt der Einsatz der Kugelfunkenstrecke den kritischeren Fall dar. Untersuchungen der stark inhomogenen Prüfstrecke bei Belastung von Gleich- überlagert mit Blitzstoßspannungen stehen noch aus.

[1] CIGRE JWG D1/B3.57. Dielectric testing of gasinsulated HVDC systems: TB 842. Paris. CIGRE, 2021.

[2] DIN 60060-1:2011. Hochspannungs-Prüftechnik - Teil 1: Allgemeine Begriffe und Prüfbedingungen, 2022.



**Alexander Schindler, Dipl.-Ing.**

**Dielektrische Barriereentladungen:  
Einfluss von Gleichspannungsimpulsen  
auf das Alterungsverhalten von  
Isolierstoffen in nasser Umgebung**

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

FKZ: 02WQ1600C

Die Herstellung von Textilien geht mit einem hohen Einsatz von unterschiedlichsten Chemikalien und einem hohen Wasserverbrauch einher [1]. Neben dem Einsatz von Farbstoffen, tragen auch Veredelungsstoffe bei technischen Textilien zum Anteil der Chemikalien bei. Um den Eintrag umweltschädlicher Stoffe in den Wasserkreislauf zu begrenzen, werden nach dem heutigen Stand der Technik Industrieabwässer vor ihrer Rückleitung in das städtische Abwasser meist mehrstufig vorbehandelt. Die dabei angewandten Behandlungsmethoden sind bisher mit hohen Betriebskosten und einer teuren Reststoffentsorgung verbunden [2].

Ein neuer Ansatz ist es Niedertemperaturplasmen zu nutzen, um langkettige umweltschädliche Stoffe in leicht abbaubare kurzkettige Stoffe aufzubrechen. Das Niedertemperaturplasma verursacht dabei eine hochspannungsimpulsinduzierte Ionisierung von Wasser und/oder Luft und einer damit einhergehenden Generierung einer hochreaktiven radikalischen Spezies. Der erfolgreiche Einsatz dieser Technologie wurde in den letzten Jahren anhand von Modellabwässern nachgewiesen [3]. Dieses Verfahren soll weiterentwickelt und in Kombination mit photokatalytisch aktiven Materialien eingesetzt werden. Der Einsatz photokatalytisch aktiver Materialien wie z.B. Titandioxid ( $TiO_2$ ) steigert die Formierung dieser hochreaktiven Spezies [4].

Fokus des Vorhabens ist das Hochskalieren dieser neuen Abwasseraufbereitungsmethode in einen anwendungsorientierten Maßstab. Die in den Anlagen verwendeten Isolierstoffe sind dabei dauerhaft multiphysikalischen Belastungen ausgesetzt. Um eine lange Betriebsdauer gewährleisten zu können, müssen die Isolierstoffe langzeitstabil sein. Mithilfe eines Lebensdauerersuches (Bild 1) werden die ausgewählten Isoliermaterialien Poly-

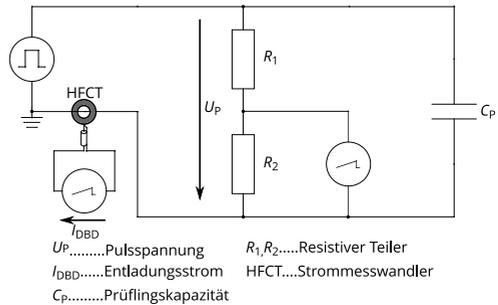


Bild 1: Konfiguration des Lebensdauerersuchsstandes

amid (PA 6.6), Polyvinylchlorid (PVC) und Polytetrafluorethylen (PTFE) untersucht. Die am Prüfling  $C_p$  angelegte Prüfpulsspannung mit einer Amplitude von 30 kV einer Anstiegszeit von ca. 100 nS und einer Wiederholfrequenz von 600 Hz wird mithilfe eines Hochspannungstastkopfes gemessen ( $R_1, R_2$ ). Ein Strommesswandler (HFCT) mit hoher Bandbreite dient zur Erfassung des Entladungs- und Polarisationsstromes. Die Teilentladungen werden mithilfe

einer Elektrodenanordnung (Bild 2) erzeugt, bei welcher die dielektrische Barriere mit leitfähigem Wasser ( $800 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) betropft wird. Die dielektrische Barriere besteht aus den zu untersuchenden Isolierstoffprüflingen mit einer Plattendicke von 5 mm.

Als Vergleichsgröße der Beständigkeit der Materialien gegenüber den Belastungen, dient das erodierte Volumen (Bild 3). Die Teilentladungen tragen Material aus den Prüflingen ab. Zurück bleiben zwei Löcher deren Volumen mithilfe eines 3D-Mikroskopes bestimmt werden. Es wird der Mittelwert aus den Volumen der beiden Löcher gebildet. Je schneller Material abgetragen wird, desto unbeständiger ist das Material gegenüber der auftretenden Belastung. Es zeigt sich, dass PA 6.6 und PVC bereits nach wenigen hundert Betriebsstunden messbar erodiert sind. PA 6.6 weist nach 400 h das höchste erodierte Volumen auf. Ursache dafür könnte die besonders hohe Wasseraufnahmefähigkeit des Materials von bis zu 4 % des Eigengewichtes [5] sein. Den beiden schwach resistenten Isoliermaterialien steht PTFE gegenüber. Dieses Material ist sehr temperaturbeständig [5] und hat eine geringe Feuchtigkeitsaufnahme. Während der Lebensdauerermessung kann keine wesentliche Erosion durch die Teilentladungen festgestellt werden. PTFE stellt sich damit als geeignetes Isoliermaterial für Umgebungen mit hoher chemischer, thermischer und elektrischer Belastung heraus.

Im nächsten Schritt soll eine Demonstratoranlage konstruiert werden, um an ihr die Wirtschaftlichkeit des neuen Niedertemperaturplasma-Prozesses zu zeigen.

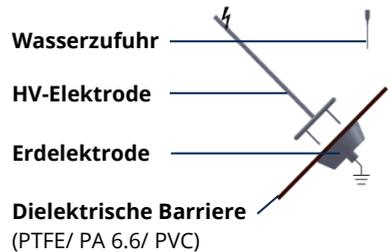


Bild 2: Elektrodengeometrie

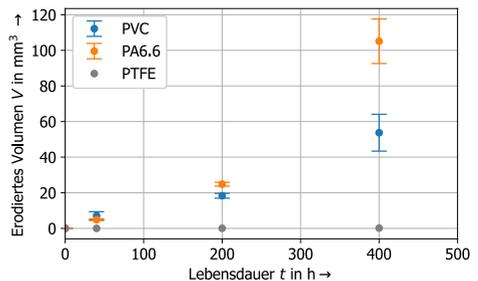


Bild 3: Erosion der Kunststoffprüflinge in Abhängigkeit der Lebensdauer

- [1] R. V. Khandare, S. P. Govindwar, "Phytoremediation of textile dyes and effluents: Current scenario and future prospects," in *Biotechnology Advances*, vol. 33, no. 8, Dec. 2015, pp. 1697-1714. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2015.09.003
- [2] S. Mani, P. Chowdhary, R.N. Bharagava, "Textile Wastewater Dyes: Toxicity Profile and Treatment Approaches," in *Emerging and Eco-Friendly Approaches for Waste Management*, R.N. Bharagava, P. Chowdhary, Ed. Singapur: Springer Nature Singapore Pte Ltd., May 2018, pp. 219-244. DOI: 10.1007/978-981-10-8669-4\_11
- [3] S. Schönekerl et al., "Evaluating the Performance of a Lab-Scale Water Treatment Plant Using Non-Thermal Plasma Technology," in *Water*, vol. 12, no. 7, Jul. 2020, p. 1956. DOI: 10.3390/w12071956
- [4] T. Mitrović et al. "Atmospheric Plasma Supported by TiO<sub>2</sub> Catalyst for Decolourisation of Reactive Orange 16 Dye in Water," in *Waste Biomass Valorization*, vol. 11, Jan. 2020, pp. 6841-6854. DOI: 10.1007/s12649-019-00928-y#
- [5] A. Küchler, „High Voltage Engineering Fundamentals-Technology-Applications,“ Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg Berlin Heidelberg, 2018, pp. 315-316. DOI: 10.1007/978-3-642-11993-4.

## Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Strombelastbarkeit und Erwärmung“



Robert Adam, Dr.-Ing.



**Thermische Untersuchungen zur Wandlung existierender AC- in neue DC-Kabelstrecken**

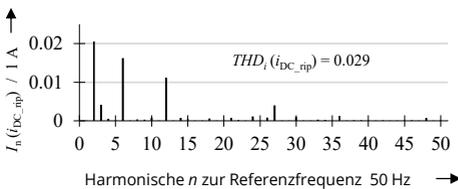
Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Im Forschungsprojekt AC<sub>2</sub>DC sollen bestehende AC-Kabelstrecken in der Mittel- und Niederspannungsebene in Punkt-zu-Punkt-DC-Verbindungen umgewandelt werden. Neben den Aufgaben für diese DC-Kabelstrecken Systemkonzepte für deren Betrieb, die entsprechenden Technologien der Umrichter sowie die Konzepte für den Schutz- und Netzbetrieb zu entwickeln, ist es eine Teilaufgabe zu prüfen, inwieweit die AC-Kabelsysteme den veränderten Beanspruchungen durch DC-Belastungen standhalten können.

Eine der wesentlichen Eigenschaften für die übertragbare Leistung der DC-Kabelstrecken ist deren Erwärmung im Betrieb. Es ist zu ermitteln, mit welchen Strömen AC-Kabel bei DC-Betrieb dauerhaft belastet werden können, ohne dass deren zulässige Grenztemperaturen überschritten werden. Maßgeblich dafür sind die erzeugten Wärme- bzw. Verlustleistungen in den Kabelsystemen. Der durch leistungselektronische Umrichter erzeugte Gleichstrom ist nicht ideal, sondern je nach Technologie mit Wechselströmen unterschiedlicher Frequenz und Amplituden (Rippelstrom) behaftet. Dies kann zu Wirbelströmen und bei entsprechender Erdung auch Kreisströme in den Schirmen und in den Leitern (PE, PEN, N) im Normalbetrieb führen. Die in den Kabelsystemen entstehenden Verlustleistungen mussten zunächst berechnet werden. Dafür wurden für die ausgewählten Kabelsysteme FEM-Modelle aufgebaut und die Verluste abhängig von Belastungen mit idealem Gleichstrom  $I_{DC, id}$ , beispielhaften Gleichstrom  $I_{DC, rip}$  mit Rippelströmen (Bild 1) und Drehstrom  $I_3$  mit den FEM-Modellen berechnet.



$$i_{DC\_rip}(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{51} (\sqrt{2} I_n \sin(n \omega t + \varphi_n)) \quad (1)$$

$$I_{DC\_rip} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t=0}^T (i_{DC\_harm}(t))^2 dt} = 1 A \quad (2)$$

$$THD_i(i_{DC\_rip}) = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{51} (I_n)^2}}{I_0} = 0.029 \quad (3)$$

Bild 1: Spektrum der Rippelströme in den DC-Strömen  $i_{DC\_rip}$

Für das Beispiel eines Niederspannungskabels (NAYY 4 x 240 0,6/1 kV) reduziert sich die Gesamtverlustleistung  $\Sigma P_V$  auf 65 %, wenn zwei der Leiter (L1 und L3) vollständig mit dem idealen Gleichstrom belastet werden.

Die Verluste bei  $i_{DC_{id}}$  und  $i_{DC_{rip}}$  unterscheiden sich nicht. Wenn ein Pol des Gleichstroms auf zwei Leiter (L1 und L3) verteilt wird, reduziert sich die Gesamtverlustleistung  $\Sigma P_V$  im Kabel auf 48 %. Der Verlust im voll belasteten Leiter L2 bleibt jedoch fast gleich wie bei AC. Hier reduzieren sich die Verluste jedoch nur um 3 % auf 97 % der Verluste bei Drehstrombelastung.

Für eine vollständige Bewertung der Strombelastbarkeit der Kabel bei der Umwandlung von Drehstrom-Kabelsystemen in Gleichstrom-Verbindungen muss neben den erzeugten Verlustleistungen auch die Wärmeübertragung der Kabel berücksichtigt werden. Insbesondere bei NS-Kabeln ist die gegenseitige thermische Beeinflussung der einzelnen Leiter sehr stark. Daher wurden die Effektivwerte der Strombelastungen in den Kabeln mit thermisch-elektrisch gekoppelten FEM-Modellen (Comsol) für die Legung in Luft ( $\vartheta_0 = 30^\circ\text{C}$ ) berechnet. Die maximal zulässige Temperaturgrenze  $\vartheta_{limit} = 70^\circ\text{C}$  (DIN VDE 0276-603:2018-04) wird nicht überschritten. Für den Ausgangspunkt einer konventionellen Drehstrombelastung beträgt der Bemessungsstrom des Kabels  $I_{3-AC} = 338\text{ A}$  (Bild 2 a). Wird das Kabel mit dem beispielhaften Gleichstrom in den Leitern (L1 und L3) mit überlagerten Rippelströmen belastet, wird ein Effektivwert von  $I_{DC_{rip}} = 410\text{ A}$  erreicht (Bild 2 b). Durch Aufteilen des Gleichstroms eines Leiters auf zwei Leiter (L1 und L3) erhöht sich die maximal zulässige Strombelastung auf  $I_{DC_{rip}} = 440\text{ A}$  (Bild 2 c). Bei den betrachteten Niederspannungskabelsystemen konnte eine maximale Steigerung der übertragbaren Leistung von 30 % erreicht werden, was die höhere Strombelastbarkeit im Gleichstrombetrieb belegt. Verglichen mit der Erhöhung der übertragbaren Leistung um 116 % aufgrund der höheren Systemspannung von  $\pm 750\text{ V}$  ist die Erhöhung aufgrund der höheren Ströme jedoch eher gering.

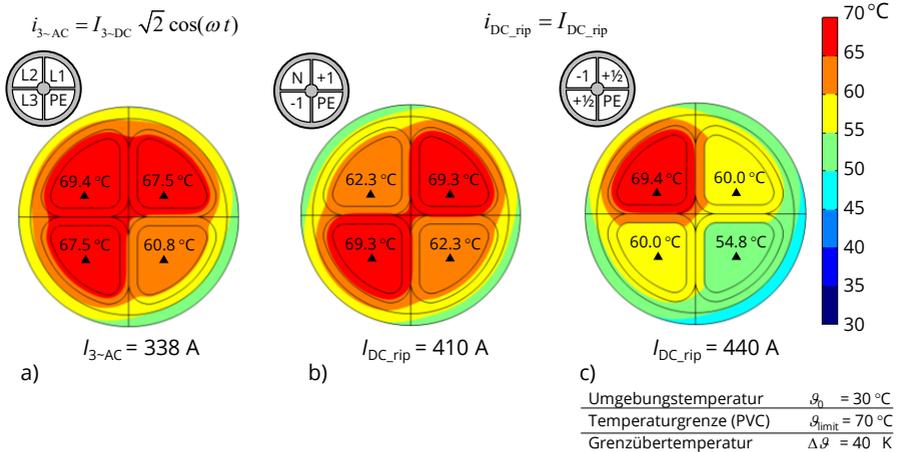


Bild 2: Strombelastbarkeit / berechnete für die Grenzüber Temperatur  $\Delta\vartheta$  in den Leitern eines NAYY 4 x 240 0,6/1 kV NS-Kabels in Luft, belastet mit dem Bemessungs-Drehstrom  $i_{3-AC}$  und dem Gleichstrom  $i_{DC_{rip}}$  mit einem  $THD_1 = 0,029$



**Markus Schladitz, Dipl.-Ing.**

**Untersuchung des Wärmeübergangs vom Heizstab in die Schiene an einer beheizten Weiche im Bahnverkehr**

Damit sich Schnee und Eis nicht an den beweglichen Komponenten von Weichen der Bahninfrastruktur ansammeln und den Stellvorgang der Weiche behindern, werden Weichenheizungen eingesetzt. Elektrische Weichenheizungen sind die im europäischen Raum am häufigsten verwendete, technische Anwendungsform von Weichenheizungen. Die Wärme wird dabei in einem Heizstab generiert. Der Heizstab besteht aus einem stromdurchflossenen Widerstandsleiter, der sich in einem Metallgehäuse befindetet. Mithilfe von Klemmen wird der Heizstab an die Schiene gepresst. Der Wärmeübergang vom Heizstab in die Schiene ist für die Erwärmung von essentieller Bedeutung. Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass ein Wärmeeintrag durch Wärmestrahlung von den nicht mit der Schiene direkt kontaktierten Seiten des Heizstabs in die Weichenkomponenten zu vernachlässigen ist. Für die Erwärmung der Weiche ist somit nur der Wärmeübergang durch die Kontaktfläche von Heizstab und Schiene maßgebend.

Die makroskopisch ebene Kontaktfläche (scheinbare Kontaktfläche) der Schiene besitzt eine Rauheit und ist teilweise mit einer dichten Korrosionsschicht überzogen. Die Oberflächen von Heizstab und Schiene berühren sich somit nur an einzelnen Punkten (mechanisch tragende Kontaktfläche). Zwischen diesen Berührungspunkten existieren luftgefüllte Kavitäten. Der Wärmeübergang vom Heizstab in die Schiene erfolgt durch Wärmeleitung über die mechanisch tragende Kontaktfläche und durch Wärmeleitung über die Luft in den Kavitäten. Die Kavitäten sind zu klein für einen konvektiven Wärmeübergang und die Temperaturdifferenz beider Oberflächen ist zu gering, als dass die Wärmeübertragung durch Wärmestrahlung einen bedeutenden Beitrag liefert. Verschiedene Untersuchungen an elektrischen Kontakten haben gezeigt, dass die Form der mikroskopischen Oberfläche der Kontaktfläche abhängig von der Kontaktkraft ist. Aufgrund dessen soll untersucht werden, ob der Wärmeübergang zwischen Heizstab und Schiene auch abhängig von der Kontaktkraft zwischen beiden Komponenten ist. Zusätzlich soll der Einfluss von Vorbehandlungen der Schienenoberfläche (blank fräsen, Einsatz von Wärmeleitpaste) auf den Wärmeübergang untersucht werden. Der Wärmeübergang kann durch den spezifischen thermischen Kontaktwiderstand  $r_{th,K}$  beschrieben werden (Gl. (1)).

$$r_{th,K} = \frac{\Delta\vartheta \cdot A}{\dot{Q}} \quad (1)$$

Zum experimentellen Bestimmen des spezifischen thermischen Kontaktwiderstands zwischen Heizstab und Schiene abhängig von Kontaktkraft und Oberflächenbehandlung wurde ein Versuchsstand entworfen. Der untersuchte Bereich der Kontaktkraft wurde anhand von Werten gewählt, die von Klemmen zum Befestigen eines Heizstabs an einer Schiene bereitgestellt werden können. In dem untersuchten Kraftbereich zeigt sich nur eine sehr geringe

Abhängigkeit des spezifischen thermischen Kontaktwiderstands von der Kontaktkraft (Bild 1).

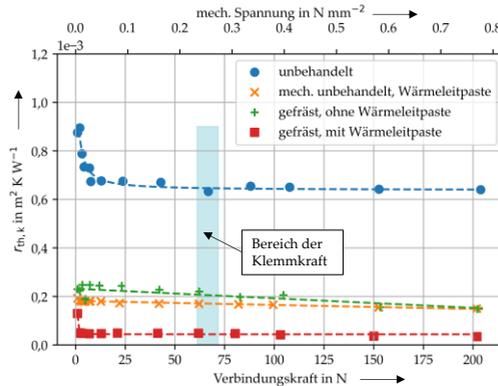


Bild 1: Experimentell ermittelter Zusammenhang zwischen spezifischem thermischen Kontaktwiderstand, Verbindungskraft und Oberflächenbehandlung

Die Klemmen zum Befestigen des Heizstabs sind in einem Abstand von 30 cm zueinander gesetzt und bedecken somit nicht die komplette Länge des Heizstabs. In dem Bereich zwischen zwei Klemmen ist der Wärmeübergang von verschiedenen Faktoren abhängig (z. B. Steifigkeit und Krümmung des Heizstabs) und kann nicht abgeschätzt werden. Deshalb wurde eine FEM-Berechnung durchgeführt, bei der die spezifischen thermischen Kontaktwiderstände im Bereich der Klemmen  $r_{th,K-Kl}$  und im Bereich zwischen den Klemmen  $r_{th,K-mi}$  unabhängig voneinander variiert wurden. Bei den Berechnungen wurden die Temperaturen auf der Oberfläche der Schiene  $\vartheta_S$  und des Heizstabs  $\vartheta_H$  ausgewertet.

Tabelle 1: Mit dem FEM-Modell berechneten Temperaturen auf Schiene und Heizstab im Bereich an den Klemmen und zwischen den Klemmen für verschiedene spezifische thermische Kontaktwiderstände

$r_{th,K-Kl}$ in $10^{-3} K m^2 W^{-1}$	$r_{th,K-mi}$	$\vartheta_{S-Kl}$ °C	$\vartheta_{S-mi}$ °C	$\vartheta_{H-Kl}$ °C	$\vartheta_{H-mi}$ °C
0	0	81,2	80,7	89,0	88,7
0,65	5	77,5	74,2	158,2	254,6
0,65	$\infty$	65,5	52,2	234,6	613,4

An den berechneten Temperaturen wird deutlich, dass ein variabler spezifischer thermischer Kontaktwiderstand zwischen zwei Klemmen nur sehr wenig Einfluss auf die Temperaturverteilung in der Schiene besitzt. Die Temperaturen am Heizstab sind hingegen sehr sensitiv bezogen auf den spezifischen thermischen Kontaktwiderstand. Aufwendige Vorbehandlungen (Fräsen, Verwenden von Wärmeleitpaste) im Bereich der Klemmen verbessern somit den Wärmeübergang nur unwesentlich. Stattdessen könnte mit einer größeren Anzahl an Klemmen der spezifische thermische Kontaktwiderstand zwischen den Klemmen niedrig und somit die Temperaturen auf dem Heizstab auch niedrig gehalten werden. Die niedrigeren Temperaturen könnten die Lebensdauer des Heizstabs erhöhen.



**Michal Sokolowski, Dipl.-Ing.**  
**Stromtragfähigkeit der Leiter in Systemen für die Erzeugung von grünem Wasserstoff**



Um den Bedarf an grünem Wasserstoff decken zu können, soll in Deutschland bis 2030 im Rahmen der Nationalen Wasserstoffstrategie 10 Gigawatt Elektrolysekapazität aufgebaut werden. Das Leitprojekt *H<sub>2</sub>Giga* widmet sich der Technologieentwicklung zur serienmäßigen Herstellung von Wasser-Elektrolyseuren, die modular an ihre jeweiligen Einsatzorte angepasst werden können. Das Verbundprojekt *HyLeiT* ist in *H<sub>2</sub>Giga* für die Entwicklung von kostenoptimierter Systemtechnik für die Erzeugung von grünem Wasserstoff verantwortlich. Durch modulare und standardisierte Gleichrichter aus Großserienfertigung können zukünftig die Systemkosten der Elektrotechnik vom Netzanschlusspunkt bis zum DC-Anschluss am Elektrolyseur im Vergleich zum aktuellen Stand der Technik halbiert werden.

Eine von *HyLeiT* entwickelte Gleichrichterlösung soll die elektrische Leistung von ca. 20 MW konvertieren können. Die modulare Bauweise setzt voraus, dass dafür vier identische unabhängige Module je 5 MW eingesetzt werden mit der Baugröße von jeweils einem 20-Fuß-Container. Jedes Modul stellt ein Gleichrichtersystem dar, bestehend aus mehreren Funktionseinheiten, die ebenfalls möglichst unabhängig sein sollen und nur über eine gemeinsame Stromschienenverbindung miteinander verbunden werden. Im Zusammenhang mit hohen angestrebten Strömen im kA-Bereich und den dadurch bedingten hohen Leitertemperaturen sowie der kompakten gekapselten Bauweise mit vielen anderen Systemkomponenten, die zu der Fremderwärmung der Leiter beitragen, ist für jede solche Funktionseinheit ein Kühlkonzept zu entwickeln. Durch die komplexen geometrischen Randbedingungen, die die Strömungsbildung in der Baueinheit bestimmen, lassen sich die bekannten empirisch-analytischen Zusammenhänge für die Bewertung der Kühlung und für das Bestimmen der Strombelastbarkeit nur begrenzt anwenden. Um die Erwärmung der stromführenden Betriebsmittel zu berechnen, müssen die numerischen Methoden und die experimentellen Aufbauten eingesetzt werden.

Dazu wurde ein CFD-Modell aufgebaut, mit dem verschiedene Kühlkonzepte am Beispiel der DC-Sektion der Anlage untersucht werden können (Bild 1). Die vom Gleichstrom durchflossenen Schienen 1 und 2 mit dem Querschnitt  $A_1$  und  $A_2$  befinden sich in einer Konstruktion (Wandtemperatur  $\vartheta_w$ , Emissionszahl  $\epsilon_w$ ) von ca.  $(1 \times 1,5 \times 0,5) \text{ m}^3$ . Mit Hilfe eines Radiallüfters wird in dem oberen Bereich ein einstellbarer Luftvolumenstrom  $\dot{V}$  mit der Temperatur  $\vartheta_e$  eingeleitet, der den Aufbau durch drei Auslassöffnungen unten mit der Lufttemperatur  $\vartheta_a$  wieder verlässt. Somit ergibt sich eine örtliche Geschwindigkeitsverteilung der Strömung  $\vec{v}_{(r)}$ , die maßgebend für die erzwungene Konvektion der Stromschienen in dem Untersuchungsgebiet ist. Um das Modell messtechnisch zu verifizieren wurde eine geeignete Versuchsanordnung entwickelt und aufgebaut (Bild 2).

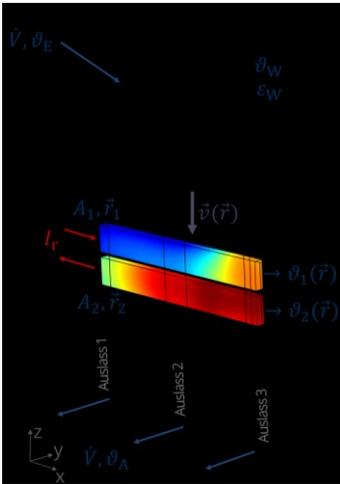


Bild 1: Modell zur Erwärmungsberechnung



Bild 2: Versuchsaufbau im Labor

Die Temperaturverteilung der Stromschienen und damit auch die Verlustleistungsdichteverteilung sind infolge der örtlichen Luftgeschwindigkeitsverteilung stark inhomogen, was entlang der Schienen in x-Richtung am deutlichsten zu sehen ist. Die Temperaturprofile der beiden mit gleichem Strom belasteten Schienen fallen unterschiedlich aus (Bild 3).

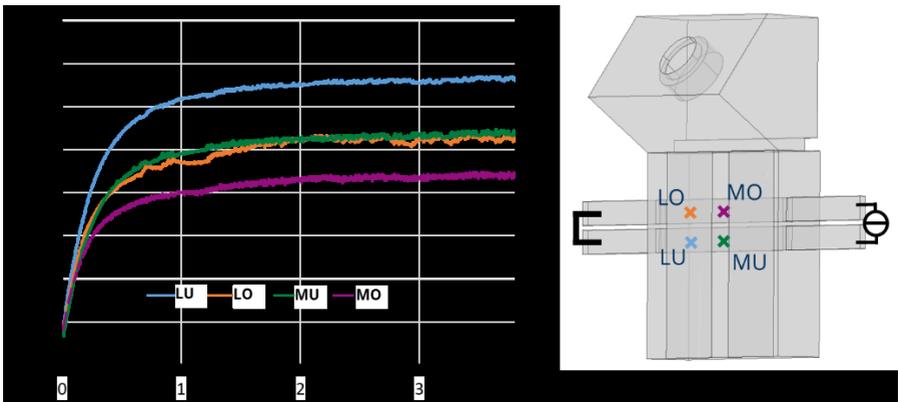


Bild 3: Temperaturverläufe ausgewählter Messstellen bei  $I_r = 7 \text{ kA}$ ,  $\vartheta_E = 28 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\dot{V} = 2000 \text{ m}^3/\text{h}$

Mit dem verifiziertem thermischen Modell ist es möglich, den Einfluss der einzelnen Parameter wie Belastung, Lüfterarbeitspunkt und Umgebungstemperatur auf die Erwärmung zu untersuchen. Damit kann die Temperaturverteilung ermittelt und das Einhalten der Grenztemperatur auch bei strengsten Randbedingungen nachgewiesen werden.

## Publikationen

### Veröffentlichungen

J. Meisner, F. Gerdinand, S. Passon, E. Gockenbach, H. Schorn, H. Saadeddine, J. Hällström, J. Havunen, U. Schichler, O. Pischler, A. Elg, J. Rovira, P. E. Roccato, S. E. Caria, A. Merev, K. Lahti, A. Dowbysch, A. Orrea, F. Böhme, T. Steiner, M. Kujda, M. Gamlin:  
Combined and Composite High-Voltage Wave Shapes: Calibration and Standardisation.  
Highvolt-Kolloquium 2023,  
Dresden, 2023.

S. Schlegel, C. Hildmann, T. Israel:  
Detachable Current-Carrying Connection for Test Setups with Milliken Conductors.  
Highvolt-Kolloquium 2023,  
Dresden, 2023.

M. A. Gödicke, C. Hildmann, S. Schlegel:  
Einfluss der Konstruktion von Pressverbindungen mit mehrdrähtigen Leitern aus Aluminiumlegierungen auf das elektrische Kontaktverhalten.  
Albert-Keil-Kontaktseminar "Kontaktverhalten und Schalten",  
Karlsruhe, 2023.

M. Schladitz, R. Adam, S. Schlegel:  
Investigations on the Heat Transfer between an Electrical Heating Rod and a Rail for Heated Railway Switch Points. MDPI Energies,  
2023.

M. Ullrich, M. Pomsel, C. Hildmann, S. Schlegel, T. Israel:  
Kurzzeitstrombelastung von Gleichstromladesteckverbindungen für elektrisch angetriebene Fahrzeuge.  
9. Symposium Connectors,  
Lemgo, 2023.

A. Dowbysch, H. P. Pampel, J. Meisner, F. Gerdinand, O. Pischler, U. Schichler:  
Measuring HVDC-Impulse Compositevoltages With High-Voltage Dividers: Laboratory Comparison and Deviation Analysis.  
International Symposium on High Voltage Engineering,  
Glasgow, 2023.

T. Götz, J. Linke, U. Riechert, S. Schlegel:  
Partial Discharge Behaviour of a Fixed Protrusion in Eco-Efficient Gas-Insulated Systems Under AC Voltage Stress.  
International Symposium on High Voltage Engineering ISH,  
Glasgow, 2023.

J. Linke, T. Götz, U. Riechert, S. Schlegel:

Partial Discharge Behaviour in GIS With Fluoronitriles: Analysis of Pressure Dependence and PD Measurement Methods.

International Symposium on High Voltage Engineering ISH,  
Glasegow, 2023.

J. Hoffmann, J. T. Linde, F. Schulz, D. Machetti, S. Schlegel:

PDIV Measurements on Aviation Electric Motor Insulation Systems - Influence of Operating Temperature and Low Air Pressure.

Elektromechanische Antriebssysteme,  
Wien, 2023.

O. Pischler, U. Schichler, J. Meisner, S. Passon, F. Gerdinand, J. Havunen, J. Hällström,

K. Lahti, R. Pietsch, M. Kujda, M. Gamlin, A. Dowbysch, H. P. Pampel:

Performance of Universal Voltage Dividers for Measurement of Superimposed Voltages.

23rd International Symposium on High Voltage Engineering,  
Glasgow, 2023.

R. Adam, C. Hildmann, M. Hemken, K. Backhaus, S. Rupp:

Research of Components for an Increase of Transmission Capacity in Distribution Grids by Changing Existing AC Links Into DC Links.

CIREN – International Conference on Electricity Distribution,  
Rome, 2023.

L. Elspaß, S. Schlegel, H. Bärnklaus:

Thermomechanical Ageing of Rotating High-Voltage Machines: Introducing a Novel Test Setup to Replicate Thermomechanical Stress.

23rd International Symposium on High Voltage Engineering,  
Glasgow, 2023.

S. Großmann, S. Schlegel:

Langzeitexperimente mit Verbindungen unter extremen klimatischen Bedingungen.

Albert-Keil-Kontaktseminar "Kontaktverhalten und Schalten",  
Karlsruhe, 2023.

**Forschung zu Störlichtbögen in der Niederspannung**

Das Ziel der Forschungstätigkeiten am National Arc fault Research Center (NARC) ist die Erhöhung der Sicherheit gegen Störlichtbögen. Die Forschungstätigkeiten reichen von der Durchführung und Auswertung von Störlichtbogenexperimenten über die Modellierung des elektrischen Verhaltens von Störlichtbögen bis hin zur Entwicklung von Algorithmen zur ultraschnellen Detektion von Störlichtbögen.

**Fehlerverhalten von Elektrolyseanlagen**

Die Herstellung von Wasserstoff mit Strom aus regenerativen Energiequellen ist ein wichtiger Bestandteil der Energiewende. Aus diesem Grund sollen die Installationsleistungen von Elektrolyseanlagen in Deutschland auf 10 GW steigen. Bei Installationsleistungen dieser Größenordnung muss die Verfügbarkeit der Elektrolyseanlagen durch geeignete Schutzkonzepte sichergestellt werden. Am NARC werden deshalb die Eigenschaften von Störlichtbögen in Elektrolyseanlagen erforscht. Eine dazu notwendige Voraussetzung ist die Charakterisierung des Fehlerverhaltens von Elektrolyseuren. Entsprechende Untersuchungen wurden zusammen mit dem Forschungszentrum Jülich durchgeführt [1].

**Ausbau der Versuchsinfrastruktur**

Beim Charakterisieren von Hochstrom-Störlichtbögen werden Kenngrößen des elektrischen Verhaltens von Störlichtbögen definiert und untersucht, wie bestimmte Systemparameter auf diese Kenngrößen auswirken. In Niederspannungsnetzen hat das Verhältnis aus Reaktanz zur Resistanz der Netzimpedanz  $X/R$  einen wesentlichen Einfluss.

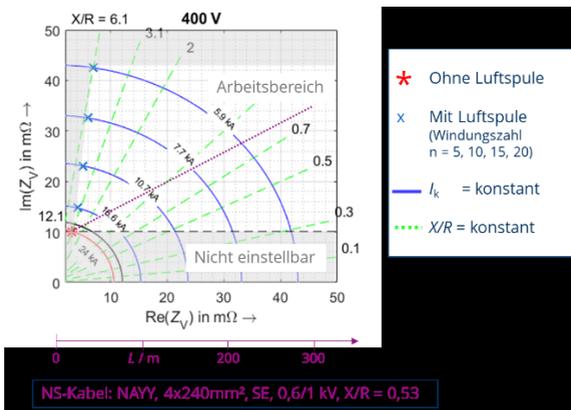


Bild 1: Impedanz der Versuchsanordnung  $Z_V$  des Hochleistungsversuchsfeldes am NARC in komplexer Darstellung im Vergleich zur Impedanzkennlinie eines typischen Niederspannungskabels bei einer Nennspannung von 400 V

Aus diesem Grund wurden zur Erweiterung der Netzersatzanlage am NARC Lastwiderstände beschafft, mit denen das zuvor genannte Verhältnis gezielt variiert werden kann. Zur Veranschaulichung der dadurch gewonnen Einstellmöglichkeiten für die simulierbare Netzimpedanz zeigt Bild 1 die Impedanz der Versuchsanordnung  $\underline{Z}_V$  des Hochleistungsversuchsfeldes am NARC in komplexer Darstellung im Vergleich zur Impedanzkennlinie eines typischen Niederspannungskabels.

### Interdisziplinäre Forschungstätigkeiten

Aufgrund des zunehmenden Einsatzes von Akkumulatoren in Elektroenergiesystemen kommt auch dem Recycling von Akkumulatoren eine zunehmende Bedeutung zu. Da Akkumulatoren nicht abgeschaltet werden können, jedoch über eine hohe Kurzschlussleistung verfügen, stellen sie außerdem ein hohes Sicherheitsrisiko dar. In Kooperation mit dem Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft der Fakultät Umweltwissenschaften an der Technischen Universität Dresden wurde die Zerlegbarkeit von Akkumulatoren getestet. Um einen stationären Akkumulator in einzelnen Zellen mit geringer Klemmspannung zu zerlegen, damit von diesem keine Gefährdung mehr ausgeht, wurden am NARC die vorgeschriebenen Maßnahmen ergriffen und die Zerlegung fachgerecht durchgeführt (s. Bild 2).



(a) Mitarbeiter am NARC mit Persönlicher Schutzausrüstung gegen Störlichtbögen



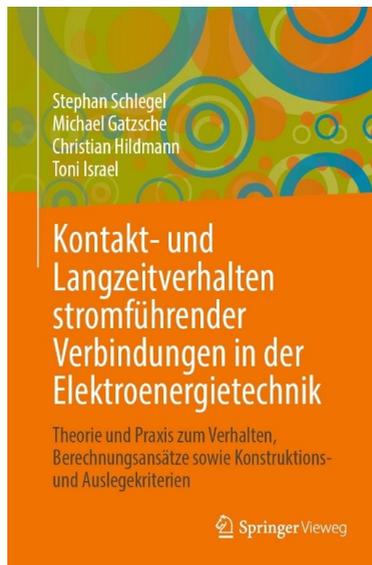
(b) Schutzmaßnahmen für die Zerlegung von Akkumulatoren

Bild 2: Zerlegen von Li-Ionen-Akkumulatoren am NARC

[1] J. Ullmer, M. Bruhns, P. Schegner: „Applicability of Methods for Short circuit current Calculation in Electrolysis systems“. IEEE Power and Energy Student Summit (IEEE PESS 2023), Bielefeld, 2023.

## Herausgabe eines Fachbuches

Am 16. März 2023 wurde ein neues Fachbuch mit dem Titel „Kontakt- und Langzeitverhalten stromführender Verbindungen in der Elektroenergietechnik - Theorie und Praxis zum Verhalten, Berechnungsansätze sowie Konstruktions- und Auslegekriterien“ über den Verlag Springer Vieweg Berlin, Heidelberg veröffentlicht. Das Buch ist für Studenten: innen, Ingenieure:innen und Wissenschaftler:innen die sich mit stromführenden Kontakten und Verbindungen im Rahmen der Aus- und Weiterbildung, der Auslegung oder der Forschung beschäftigen. Die zusammengefassten Ergebnisse und Erkenntnisse basieren auf über 40 Jahren Forschung an der Professur für Hochspannungs- und Hochstromtechnik an der Technischen Universität Dresden. Die Autoren verstehen sich als Teil einer Forschungsgruppe, die in dieser Zeit eine einmalige Arbeit zum Thema Kontakt- und Langzeitverhalten von ruhenden, stationären Verbindungen geleistet haben.



Cover des Fachbuchs: „Kontakt- und Langzeitverhalten stromführender Verbindungen in der Elektroenergietechnik - Theorie und Praxis zum Verhalten, Berechnungsansätze sowie Konstruktions- und Auslegekriterien“ - ISBN 978-3-662-64657-1

Es werden die Theorie zur Kontaktphysik, die wichtigsten Leiter- und Beschichtungswerkstoffe, Einflussgrößen auf das elektrische Kontaktverhalten, der Zusammenhang zwischen mechanischem und elektrischem Kontaktverhalten, die Physik der Alterung und die Wirkung auf das Langzeitverhalten bei unterschiedlichen Einsatz- und Umgebungsbedingungen sowie Auslegungskriterien für die Konstruktion beschrieben. Weiterhin werden Ansätze zur numerischen Modellierung des elektrisch-mechanisch-thermischen Verhaltens dargestellt sowie Bewertungskriterien und Prüfverfahren zur Qualifizierung vorgestellt.

## Preise und Auszeichnungen

### Franz-Stolze-Preis 2023

Mit dem Franz-Stolze-Preis werden jährlich herausragende wissenschaftliche Abschlussarbeiten von Studierenden und jungen Wissenschaftler:innen der TU Dresden auf dem Gebiet der Energietechnik gewürdigt. 2010 wurde der nach Franz Stolze benannte Preis erstmals an der TU Dresden vergeben.

In diesem Jahr gab es zwei Preisträger. Seitens der Professur für Hochspannungs- und Hochstromtechnik hat Herr Dr. Thomas Götz für seine Dissertation zum Thema „Teilentladungsverhalten von Gas-Feststoff-Isoliersystemen unter Gleichspannungsbelastung“ die Auszeichnung erhalten.

Aus den Erkenntnissen der im Jahr 2022 veröffentlichten Arbeit werden Prüfeempfehlungen für die Teilentladungsdiagnose von gasisolierten Gleichspannungssystemen abgeleitet. Diese sind wesentlicher Bestandteil für einen zukünftigen Einsatz gasisolierter Gleichspannungssysteme in einem leistungsfähigen Elektroenergiesystem mit hoher Versorgungszuverlässigkeit.



Preisverleihung zum "Tag der Fakultät Maschinenwesen" am 24. Juni 2023, v.l.n.r. Dr.-Ing. Marcus Thiele, Dr.-Ing. E.h. Manfred Freimark, Dr.-Ing. Thomas Götz

Foto: TU Dresden

## Förderpreis des Vereins "Freunde und Förderer der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der TU Dresden e.V."

Der Fakultätsverein "Freunde und Förderer der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der TU Dresden e.V." verleiht jährlich einen Förderpreis für besonderes Engagement für die Fakultät. Es ist eine Freude, dass das Engagement von Frau Lena Elspaß, wissenschaftliche Mitarbeiterin der Professur für Hochspannungs- und Hochstromtechnik, in diesem Jahr mit ebendiesem Preis gewertschätzt wird.

Besonders hervorzuheben ist ihr Engagement als Gleichstellungsbeauftragte der Fakultät, dass neben dem Wahrnehmen ihrer Funktion in Berufungskommissionen, Fakultätsrat und weiteren Arbeitskreisen auch das Organisieren einer Summer School für junge Wissenschaftlerinnen und Studentinnen aus dem MINT-Bereich umfasst. So fand im September 2022 zum zweiten Mal die Summer School *Connecting Female Scientists* mit dem Themenschwerpunkt Energiespeichersysteme statt, die Frau Elspaß gemeinsam mit Frau Linke, Herrn Linde und Frau Schmidt für die Fakultät organisierte. Wissenschaftlerinnen verschiedener Länder und Hochschulen hatten so die Chance sich tiefer in ein Themenfeld einzuarbeiten, mit Rollenvorbildern in Kontakt zu kommen und gleichzeitig die Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik sowie die TU Dresden kennenzulernen.

Neben ihrer Tätigkeit als Gleichstellungsbeauftragte engagiert sich Frau Elspaß bei der Durchführung des Girls Days und als MINT-Botschafterin, um die Fakultät ebenso wie die TU Dresden als attraktive Option für junge Schülerinnen bekannt zu machen.

Wir freuen uns über die Auszeichnung und Wertschätzung von Frau Elspaß' Engagement im Bereich der Gleichstellung für die Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik.



Teilnehmerinnen und Organisator:innen der Summer School *Connecting Female Scientists* 2022

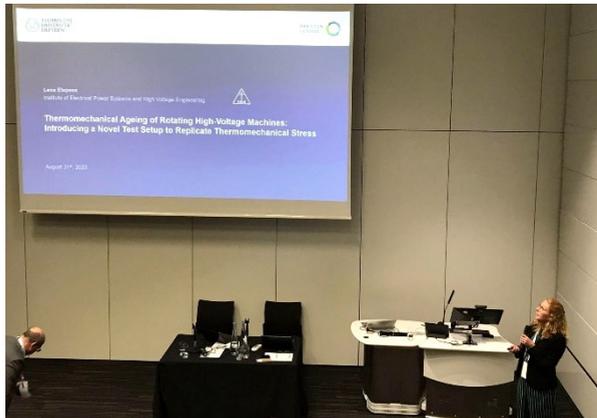
Foto: IEEH

## Best Paper Award (Oral Presentation) beim International Symposium on High Voltage Engineering ISH 2023

Im Rahmen der Fachkonferenz ISH 2023, die vom 27.08.2023 bis zum 01.09.2023 in Glasgow, Schottland stattfand, war die Professur Hochspannungs- und Hochstromtechnik mit gleich vier Fachbeiträgen aus den Themenfeldern alternative Gase, überlagerte Prüfspannungen und rotierende Hochspannungsmaschinen vertreten. Während der einschlägigen Fachkonferenz hatten die beiden Teilnehmerinnen Johanna Linke und Lena Elspaß nicht nur die Möglichkeit die Forschung der Professur vorzustellen, sondern auch an einem technischen Besuch eines Windparks teilzunehmen sowie mit Wissenschaftler:innen und Industrieverter:innen aus dem Bereich der Hochspannungstechnik ins Gespräch zu kommen. Im Rahmen der Konferenz wurde der Beitrag von Lena Elspaß „Thermomechanical Ageing of Rotating High-Voltage Machines: Introducing a Novel Test Setup to Replicate Thermomechanical Stress“, der die Nachbildung thermomechanischer Alterung an langen rotierenden Maschinen thematisiert, mit dem Best Paper Award (Oral Presentation) ausgezeichnet. Dabei setzt sich die Gesamtwertung zu gleichen Anteilen aus der Bewertung des Papers sowie der Bewertung der Präsentation zusammen. Wir gratulieren Frau Elspaß für ihre Auszeichnung bei dieser renommierten Fachkonferenz und freuen uns über die Wertschätzung ihrer wissenschaftlichen Ergebnisse durch das Fachpublikum.



(a) Teilnehmerinnen an der ISH 2023 (vlnr):  
L. Elspaß, J. Linke



(b) L. Elspaß beim Vortrag zur thermomechanischen Alterung von rotierenden Hochspannungsmaschinen

Lena Elspaß und Johanna Linke beim International Symposium on High Voltage Engineering 2023

Foto: IEEH

## HIGHVOLT-Preis 2022

Zum diesjährigen Tag der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik wurde, wie bereits seit 2008, der HIGHVOLT-Preis für die beste Diplomarbeit im Bereich Elektroenergie-technik verliehen. Besonderheit dieses Jahr: Es wurde der HIGHVOLT-Preis für das Jahr 2022 und 2023 vergeben.

Die Auszeichnung für 2022 erhielt die Diplomarbeit mit dem Titel „Entwicklung eines Transformator-Modells in natürlichen Größen und Integration in ein Netzberechnungsprogramm“, die an der Professur für Elektroenergieversorgung entstand. Thomas Steiner, technischer Leiter HIGHVOLT-Prüftechnik Dresden GmbH, überreichte den Preis an die Preisträgerin Laura Fiedler, die seit Oktober 2022 wissenschaftliche Mitarbeiterin des Institus für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik ist.



Übergabe des HIGHVOLT-Preises an Laura Fiedler durch Thomas Steiner

Foto: Lukas Lorenz

In der Diplomarbeit wurde ein Drei-Phasen-Zwe Wicklungstransformator-Modell implementiert, das symmetrische und unsymmetrische Transformatoren abbilden kann. Die Modellierung im natürlichen System benötigt für die Abbildung der Unsymmetrie zuzüglich zu den Typenschilddaten lediglich die Verhältnisse der Querschnitte und Längen der Joche und Schenkel zueinander. Das generische Modell kommt dabei im Vergleich zu anderen Ansätzen mit weniger Daten aus und zeigt dennoch eine signifikant höhere Genauigkeit in den durchgeführten Messungen. Weitere Ausführungen dazu finden sich im Jahresbericht 2022.

## Promotionen



**Julian Heger, Dr.-Ing.**

**Entwurf und Verifikation des  
Wärmenetzmodells eines explosions-  
geschützten Niederspannungs-  
Energieverteilers zur thermischen  
Dimensionierung durch Berechnung**

Explosionsschutz Niedervoltage-Energieverteiler werden eingesetzt, um Elektroenergie in explosionsfähigen Atmosphären sicher zu übertragen und zu verteilen. Um einen über Jahrzehnte zuverlässigen und sicheren Betrieb zu gewährleisten, sind die Energieverteiler mindestens derart thermisch zu dimensionieren, dass normativ festgelegte Grenztemperaturen nicht überschritten werden. Bisher wird ein wesentlicher Anteil dieser thermischen Dimensionierung und des Nachweises experimentell erbracht. Der experimentelle und in Folge auch der finanzielle Aufwand ist wegen des komplexen Aufbaus der explosionsschutz Niedervoltage-Energieverteiler (Bilder 1 und 2) und der Vielzahl an verschiedenen Kombinationen von Modulen und Baugruppen sehr hoch. Die Wärmenetzmethode ist bereits ein etabliertes Verfahren, um die Erwärmung konventioneller elektrischer Betriebsmittel und Anlagen u. a. im Rahmen der thermischen Dimensionierung effizient zu berechnen. Ziel dieser Arbeit ist daher, die Wärmenetzmethode weiter zu entwickeln, um die Erwärmung von explosionsschutz Niedervoltage-Energieverteilern effizient berechnen zu können.



Bild 1: Explosionsschutz Niedervoltage-Energieverteiler in modularer Bauweise

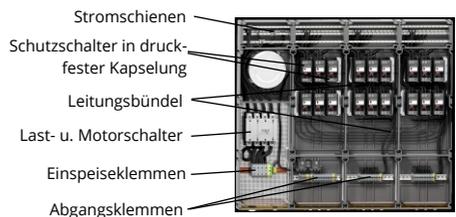


Bild 2: Betriebsmittel eines explosionsschutz Niedervoltage-Energieverteilers

An einem ausgewählten Beispiel werden die maßgeblichen Wärmequellen und Vorgänge der Wärmeübertragung ermittelt, korrespondierende Berechnungsmodelle erarbeitet und in die Wärmenetzmethode integriert. Das aufgebaute Gesamtwärmenetz wird experimentell verifiziert. Die notwendige Temperaturmessung erfolgt u. a. mit einer für die druckfesten Kapselungen angepassten Oberflächenmontagetechnik von Thermoelementen. Die Anpassungen waren erforderlich, da ein auf die Oberfläche einer druckfesten Kapselung montierter Temperatursensor mit einer kleinen Kontaktfläche und frei in der Luft verlegten Sensordrähten eine um bis zu 50 % zu gering gemessene Oberflächenübertemperatur bestimmt. Im Unterschied zu den konventionellen Schaltgeräten führen die druckfesten Kapselungen explosionsschutz Betriebsmittel eine weitere Ebene der Wärmeübertragung

ein. Bei Wandstärken von rund 10 mm und geringen Wärmeleitfähigkeiten von  $0,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  sind fein strukturierte Wärmenetze (Bild 3) erforderlich, insbesondere im Bereich der erwarteten Hotspot-Temperaturen, um die für den Erwärmungsnachweis maßgeblichen maximalen Oberflächentemperaturen hinreichend genau zu berechnen.

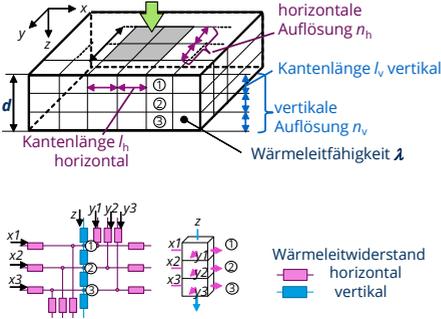


Bild 3: Hoch aufgelöstes Wärmenetz der Wand einer druckfesten Kapselung

Im Vergleich zu konventionellen Schaltgerätekombinationen zeichnen sich die explosionsgeschützten Energieverteiler außerdem durch einen deutlich feingliedrigeren Verteileraufbau aus. Durch das Einführen einer Strömungswiderstandszahl  $k_w$ , die den Strömungswiderstand des feingliedrigen Aufbaus repräsentiert, lässt sich die Strömungsgeschwindigkeit der umlaufenden Luft bei einer über der Höhe linear verteilten Lufttemperatur direkt im Wärmenetz berechnen. Um die Erwärmung der gebündelten Leitungen zu berechnen, wird aus dem Ansatz der logarithmischen Mischungsregel nach *Lichtenecker* [1] ein

Modell für eine wirksame Wärmeleitfähigkeit entwickelt (Gl. 1) und experimentell verifiziert.

$$\lambda_{\text{eff B}} = \lambda_{\text{Ltg}}^F (\lambda_{\text{s äqui}} + \lambda_{\text{Luft}})^{(1-F)} \tag{1}$$

- $\lambda_{\text{eff B}}$  wirksame radiale Wärmeleitfähigkeit des Leitungsbündels
- $\lambda_{\text{Ltg}}$  transversale Wärmeleitfähigkeit einer Leitung
- $\lambda_{\text{s äqui}}$  äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Wärmeübergangs durch Strahlung
- $\lambda_{\text{Luft}}$  Wärmeleitfähigkeit der Luft
- $F$  Füllgrad des Leitungsbündels

Mit dem verifizierten Gesamtwärmenetz kann die Erwärmung des untersuchten explosionsgeschützten Energieverteilers gut berechnet werden. Die Abweichungen zwischen den berechneten und den gemessenen Übertemperaturen liegen für die meisten Messpunkte innerhalb der erweiterten Gesamtmessunsicherheit (erweiterten Gesamtmessunsicherheit:  $\Delta\Theta = 3,1 \text{ K}$  für gut wärmeleitende Körper,  $\Delta\Theta = 3,3 \text{ K}$  für gering wärmeleitende Körper und  $\Delta\Theta = 4,5 \text{ K}$  für den Kühlmittelstrom). Mit dem Wärmenetz können zudem Temperaturen auch für die Teile und Bereiche berechnet werden, die bei einem experimentellen Nachweis kaum zugänglich sind (z. B. das Innere der druckfesten Kapselungen, innenliegende Leitungen in Leitungsbündeln, ...). Die Arbeit bildet die Grundlage, um zielgerichtet die Wärmenetze für weitere explosionsgeschützte Betriebsmittel aufzubauen, zu verifizieren und in die Wärmenetzbibliothek zu integrieren. Dann wird es möglich, die Erwärmung für ein größeres Portfolio an explosionsgeschützten Anlagen berechnen zu können.

[1] K. Lichtenecker, "Die Ableitung der logarithmischen Mischungsregel aus dem Maxwell-Rayleighschen Schrankenwertverfahren," Kolloidchemische Beihefte 23, p. 285–291, Aug. 1926.

# Kooperationen

## Kooperationen National

### Wissenschaftskooperationen

BA Batzen  
Energieforschungsinstitut Dresden e.V.  
Energy Saxony e.V.  
fem Forschungsinstitut  
Fraunhofer IGP  
Fraunhofer IEE  
Fraunhofer IKTS  
Fraunhofer IWS  
Fraunhofer EMFT  
Leibniz Universität Hannover  
Hochschule Düsseldorf  
Hochschule Zittau/Görlitz (FH)  
HTW Dresden

HTW Saarland, Saarbrücken  
HTWK Leipzig  
INP Greifswald e.V.  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
Physikalisch-Technische Bundesanstalt - PTB  
Technische Universität Braunschweig  
Technische Universität Darmstadt  
Technische Universität Freiberg  
Technische Universität Ilmenau  
Technische Universität München  
Universität Bremen  
Universität Duisburg-Essen  
Universität Stuttgart

### Industriekooperationen

50Hertz Transmission GmbH  
Acelor Mittal Europe  
Alcunifer  
Amprion GmbH  
A.Eberle GmbH & Co.KG  
Bayernwerk Netz GmbH  
BBC Cellpack GmbH  
BMW AG  
bnNETZE GmbH  
BSD Bildungs- und Servicezentrum GmbH  
Cteam Consulting & Anlagenbau  
Daimler AG  
Dehn & Söhne GmbH  
DlgSILENT GmbH

DKE AG  
DNV GL Energy  
Emacons consulting GmbH  
EnBW Energie Baden-Württemberg AG  
EnBW Regional AG  
EnBW Regional AG  
engstKABEL GmbH & Co. KG  
envia Mitteldeutsche Energie AG  
E.ON Avacon  
E.ON edis AG  
Forum Netztechnik Netzbetrieb im VDE  
Framatome GmbH  
F&S PROZESSAUTOMATION GmbH  
GBS Elektronik GmbH

GEIRI (Global Energy Interconnection Research  
Institute Europe) GmbH  
GWT-TUD GmbH  
HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH  
LAPP Insulator GmbH  
LTB Leitungsbau GmbH  
Maschinenfabrik Reinhausen GmbH  
Megger Germany GmbH  
Metallux GmbH  
NH-HH-Recycling e.V.  
ohv diagnostic  
Omwxon Hochspannung GmbH  
Omicron electronics GmbH  
Rolls-Royce Deutschland Ltd. & Co KG  
Rosenberger Hochfrequenz GmbH & Co. KG  
RWE AG  
SachsenEnergie AG

SachsenNetze GmbH  
SachsenNetze HS.HD GmbH  
Schaeffler Technologies AG & Co. KG  
Schneider Electric GmbH  
Siba GmbH  
Siemens AG  
Siemens Energy GmbH  
SMA Technologie GmbH  
Südkabel GmbH  
TE Connectivity Germany GmbH  
Thomas Werner Industrielle Elektronik eKfm  
TenneT TSO GmbH  
TransnetBW GmbH  
VEM Sachsenwerk GmbH  
Weitkowitz GmbH

## Kooperationen International

### Wissenschaftskooperationen

Aalto University/Finnland

Auburn University, USA

Brno University, Tschechische Republik

Federal University of Juiz de Fora, Brasilien

India Institute of Technology Madras, Indien

Kings College London, UK

LNE Laboratoire national de métrologie  
d'essais METAS, Bern, Schweiz

ort Said University, Ägypten

UFPA, Brasilien

University of Edinburgh

Universidad Nacional de San Juan, Argentinien

Università degli Studi della Campania Luigi  
Vanvitelli, Naples, Italien

Universidad Nacional de Colombia, Kolumbien

University of Canterbury, Neuseeland

University of Liberec, Tschechische Republik

University of Naples Parthenope, Italien

University of Stellenbosch, Südafrika

Wroclaw University of Technology, Polen

University of Canterbury in Christchurch, Neu-  
seeland

### Industriekooperationen

Camille Bauer Metrawatt AG, Schweiz

Energie AG Oberösterreich

EWZ - Elektrizitätswerk der Stadt Zürich

Pfiffner Messwandler AG, Schweiz

Hightechzentrum Aargau

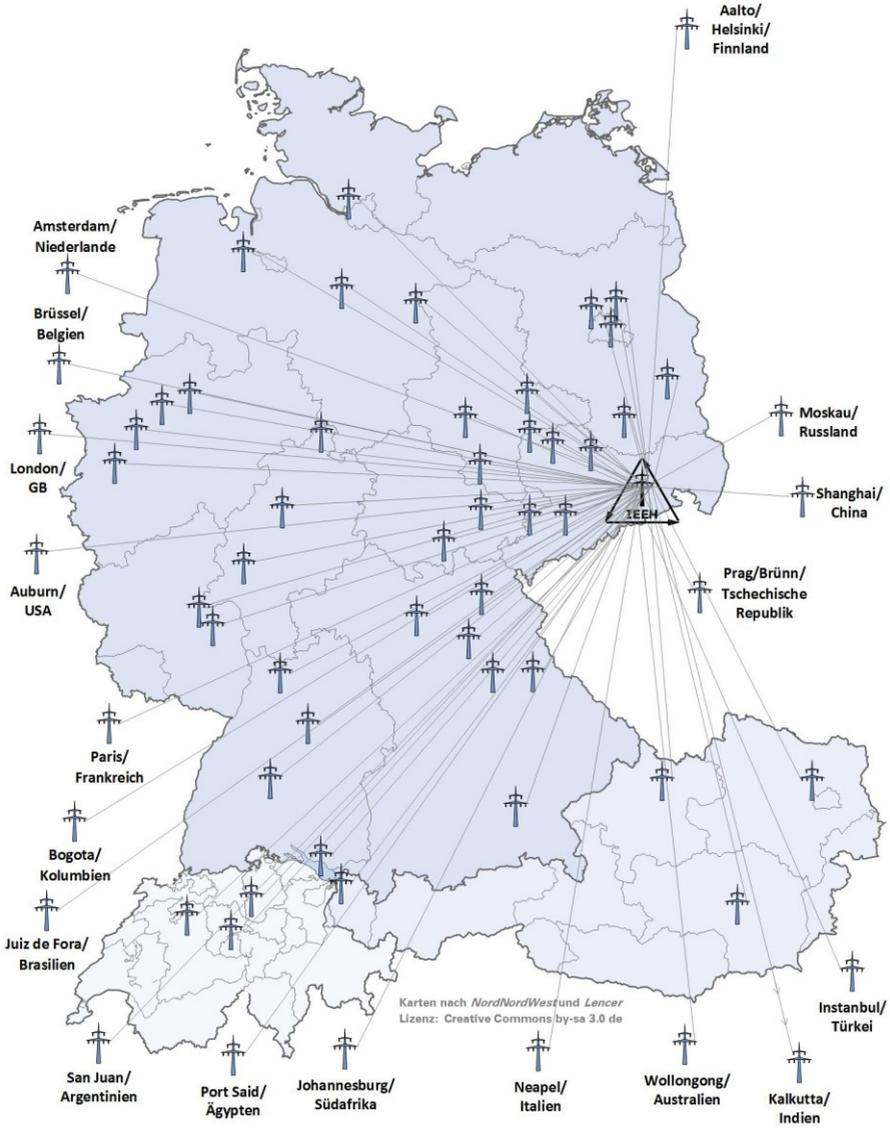
Hitachi Energy, Schweiz

PPC Insulators

ProRail N.V., Niederlande

Stäubli Electrical Connectors AG, Schweiz

APG Austrian Power Grid AG



## Kommissions- und Gremienarbeit

### Lehrstuhl Elektroenergieversorgung

Dozent Dr.-Ing. Hartmut Bauer

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

Dr.-Ing. Ana Maria Blanco

- CIRE Session Advisory Group (Session 2: Power Quality & EMC)

M. Sc. Christian Jäschke

- Schriftführer des VDE Dresden
- Energy Saxony Arbeitskreis *Energetechnische Komponenten*

Dipl.-Ing. Sebastian Krahmer

- VDE Dresden Arbeitskreis: *Verteilungsnetze*
- ETG/GMA Fachausschuss: *V2.1/FA 7.16 Netzregelung und Systemführung* (Gast)

Dipl.-Ing. Carlo Liebermann

- ETG/ITG/FNN Arbeitsgruppe *Zentralschutzsysteme*

Prof. Dr.-Ing. habil. Jan Meyer

- VDE Dresden Arbeitskreis: *Netrückwirkungen*
- DK CIRE and CIRE Technical Committee (Session 2: Power Quality & EMC)
- DKE/UK 767.1 *Niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen* (stv. Obmann)
- VDE/FNN Expertennetzwerk *Netrückwirkungen*
- D-A-CH-CZ Arbeitsgruppe *EMV* (Technische Regeln zur Beurteilung von Netrückwirkungen)
- CENELEC TC205A WG11 *Mains Communication Systems/Immunity*
- CIRE/CIGRÉ Working Group C4.40 *Revisions to IEC Technical Reports 61000-3-6, 61000-3-7, 61000-3-13, and 61000-3-14*
- CIRE/CIGRÉ Working Group C4.42 *Continuous assessment of low-order harmonic emissions from customer installations*
- CIGRÉ Working Group C4.63: *Harmonic power quality standards and compliance verification – a comparative assessment and practical guide*
- CIGRE Working Group A3.45 *Methods for identification of frequency response characteristics of voltage measurement systems*
- IEEE PES Working Group on Harmonics (IEEE 519)
- IEEE TF on harmonic modelling

Dipl.-Ing. Marta Sophia Potyka

- VDE Dresden Arbeitskreis *Starkstromanlagen bis 1000 V*
- DKE/AK 221.1.2 *Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag*

Dipl.-Ing. Robert Stiegler

CIGRE Working Group A3.45 *Methods for identification of frequency response characteristic of voltage measurement systems*

Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner

VDE (ETG) Task Force *Grundsätzliche Auslegung Neuer Netze* (Vorsitzender)

CIGRÉ Study Committee B5 *Protection and Automation*

Freunde und Förderer der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik (Mitglied des Vorstands)

VDE Dresden Arbeitskreis: *Relais- und Schutztechnik*

Dipl.-Ing. Sasan Jacob Rasti

VDE (ETG) Task Force *Zukunftsbild Energie*

## **Lehrstuhl Hochspannungs- und Hochstromtechnik**

Dipl.-Ing. Lena Elspaß

IEC TC 2 MT 10 *Rotating Machinery – Qualification, tests and diagnostics of winding insulation systems*

DKE AK 311.0.6 *Isoliersysteme* (Gast)

Dr.-Ing. Christian Hildmann

IEC TC 11 JWG 13 *Overhead lines*

DKE AK 421.0.5 *Komponenten* (Gast)

Dipl.-Ing. Thomas Linde

CIGRE WG D1.74 *PD measurement on insulation systems stressed from HV power electronics*

Dipl.-Ing. Johanna Linke

CIGRE WG D1.78 *Partial discharge properties of non-SF<sub>6</sub> insulating gases and gas mixtures*

PD Dr.-Ing. habil. Stephan Schlegel

DKE AK 411.3.2 *Verbinder*

DKE AK 411.3.1 *Hochspannungsgarnituren* (Gast)

AK ASIL-Metrik im Bordnetz (Gast)

VDI-GPP FA 734 *Stromführende Schraubenverbindungen* (Stellvertretender Vorsitzender)

VDE GMM FA 3.4 *Optische und Elektronische Verbindungstechnik*

# Veranstaltungen

## Dresdner Kreis

Der Dresdner Kreis bietet jungen, wissenschaftlichen Mitarbeiter:innen der Universitäten Magdeburg, Hannover, Dresden und Duisburg-Essen die Möglichkeit im Rahmen eines wissenschaftlichen Kolloquiums ihre aktuellen Forschungsthemen aus den unterschiedlichsten Bereichen der Elektroenergieversorgung zu präsentieren und im Anschluss zu diskutieren. Neben dem wissenschaftlichen Austausch wird den Teilnehmenden die Möglichkeit gegeben Kontakte zu den anderen Universitäten zu knüpfen und die Gastgeberstadt kulturell kennen zu lernen.



Teilnehmer:innen des „Dresdner Kreises“ auf Helgoland

Foto: IEEH

Das 23. Treffen zum Dresdner Kreis fand in diesem Jahr vom 13. bis zum 16.06.2023 auf Helgoland unter dem Namen Helgoland Power and Energy Conference (HPEC 2023) statt. Am ersten Tag besichtigten die Teilnehmenden nach der Anreise in Hamburg das IEC-61850-Prüflabor von Stromnetz Hamburg. Abgeschlossen wurde der erste Tag mit einem gemeinsamen Abendessen. Am zweiten Tag fuhren alle gemeinsam mit der Fähre nach Helgoland. Nach der Ankunft wurden im Rahmen der HPEC insgesamt acht aktuelle Forschungsthemen vorgestellt. Am dritten Tag fand eine Besichtigung der Leitwarte für die Offshore-Windparks der RWE Renewables Trident Offshore GmbH statt. Anschließend wurde vor der Rückfahrt nach Hamburg der Offshore-Windpark Kaskasi mit der Fähre durchfahren. Dabei boten sich einzigartige Blicke auf die Windkraftanlagen und Konverterstationen aus nächster Nähe.

## Get-together im Rahmen des IEEH-Kolloquiums mit der Firma E.Dis

Am 20. Juni 2023 fand auf der Freifläche der Hochspannungshalle das Get-together im Rahmen des IEEH-Kolloquiums mit der Firma E.Dis statt. Die Ankündigung versprach einen informellen Austausch mit Mitarbeitenden des IEEH und Kollegen von E.Dis zu aktuellen Forschungsthemen sowie Karrieremöglichkeiten im Institut und bei E.Dis. An dieser Veranstaltung nahmen insgesamt 50 Personen teil, darunter Mitarbeiter der Professuren für Elektroenergieversorgung und Hochspannungstechnik sowie Studierende, die sich in der Vertiefung Elektroenergietechnik befinden. Besonders erfreulich war die Teilnahme der Kollegen von der Firma E.Dis.



Gemeinsame Abendveranstaltung im Rahmen des Kolloquiums

Fotos: IEEH

Die Teilnehmer wurden großzügig mit Getränken und Essen versorgt, das von engagierten Mitarbeitern vor Ort gegrillt und vorbereitet wurde. Diskussionen über Lehre, Forschung und zukünftige Perspektiven für Absolventen der Energietechnik standen im Mittelpunkt der Gespräche. Das Get-together bot eine einzigartige Gelegenheit für Studierende, wissenschaftliche Mitarbeiter und Vertreter der Firma E.Dis, sich in informellem Rahmen zu treffen. Hierbei konnten nicht nur aktuelle Forschungsthemen besprochen werden, sondern es wurde auch ein Blick auf mögliche Karrierewege innerhalb des Instituts und bei E.Dis geworfen. Die Veranstaltung stellte somit nicht nur eine Plattform für den fachlichen Austausch dar, sondern förderte auch das Networking zwischen den Studierenden, den wissenschaftlichen Mitarbeitern des Instituts und den Kollegen in der Industrie.

## Lange Nacht der Wissenschaften

Am 30. Juni wurden im Rahmen der Dresdener Langen Nacht der Wissenschaften Störlichtbogenexperimente am National Arc Fault Research Center der Professur für Elektroenergieversorgung (NARC) vorgeführt. Dabei wurde eindrucksvoll gezeigt, wie schnell sich ein Störlichtbogen aufgrund der Lorentzkraft entlang einer Schienenanordnung bewegt. Ein weiteres Experiment zeigte die Gefahr für den Menschen, die von einem Störlichtbogen ausgeht. Dafür wurde einer metallischen Puppe ein einfaches T-Shirt angezogen, welches sich aufgrund der extrem hohen Temperaturen entzündet.



Störlichtbogenvorführung zur Langen Nacht der Wissenschaften

Foto: Ricardo Herrmann

Parallel zur Veranstaltung am NARC wurde nach 3-jähriger Pause in der Hochspannungshalle der TUD Dresden wieder der beliebte und hochspannende Experimentalvortrag „Faszination Elektrizität – Experimente zu hochspannungstechnischen Phänomenen und technischen Lösungen“ angeboten. Die vorgeführten Experimente zeigen Entladungsphänomene und technische Lösungen, die bei der Gestaltung und Dimensionierung von Anlagen der Elektroenergietechnik maßgeblich sind. Abschließend konnten sich Mutige von der bei Blitzseinschlag schützenden Funktion eines Faradayschen Käfigs in einem Fahrzeug überzeugen.

## **Assistentenfahrt der Professur Hochspannungs- und Hochstromtechnik in die Niederlausitz und nach Nordsachsen, 28.07. - 30.07.2023**

Die diesjährige Assistentenfahrt führte uns nach Südbrandenburg und Nordsachsen. Die Lage der Unterkünfte in Falkenberg (Elster) war optimal gewählt, um die Highlights der Region kennenzulernen. Am ersten Abend fand jedoch erst einmal ein gemütliches Beisammensein bei Speis und Trank statt. Am Samstagvormittag ging es dann nach Lichterfeld zum Besucherbergwerk F60. Dort ist die originale F60 Förderbrücke, die zum Abbau von Braunkohle verwendet wurde, zu besichtigen. Die Förderbrücke gilt als größte technische Arbeitsmaschine mit einer Länge von 502 m, eine Höhe von 80 m und einem Gewicht von 13.500 t. Während ihrer Betriebszeit erreichte sie eine Förderleistung von 23.000 m<sup>3</sup>/h. Das Begehen der imposanten Brückenkonstruktion, sowie der versierte fachliche Austausch mit dem Bergwerksführer machten den Ausflug zu einem eindrucksvollen Erlebnis. Der Tag wurde mit einem anschließenden Spaziergang durch die Heidellandschaft und einer abendlichen Stärkung abgeschlossen.



Zwischenstopp am höchsten Punkt der F60-Förderbrücke



Kellergewölbe unter der Altstadt von Torgau

Fotos: Markus Schladitz

Am Sonntag wurde die Renaissancestadt Torgau besucht. Im Bereich der Altstadt wurde eine Führung durch verschiedene historische Keller organisiert. Die Altstadt Torgaus wurde auf einem Porphyrfelsen erbaut. Aufgrund der Härte dieses Materials erhielt das Schloss Torgaus (Schloss Hartenfels) auch seinen Namen. Dieser Porphyrfelsen konnte in verschiedenen Kellern betrachtet werden, was inzwischen im oberirdisch begehbaren Teil der Stadt aufgrund der Bebauung nicht mehr möglich ist. Mit einem Spaziergang an den größten Sehenswürdigkeiten der Stadt und dem Gelände der Landesgartenschau des letzten Jahres wurde die diesjährige Assistentenfahrt offiziell beendet und alle Teilnehmer konnten zufrieden die Rückreise antreten.

### 30. Kolloquium „Hochspannungs- und Anlagentechnik“ an der Technischen Universität Ilmenau vom 11. - 13.09.2023

Vor über 30 Jahren, 1992, gab es an der TU Darmstadt die Initiative, das es einen Austausch zwischen den Hochschulen mit besonderem Augenmerk auf die Doktoranden geben soll. Dies war Anlaß das Hochspannungskolloquium erstmals im Jahr 1993 in Darmstadt stattfinden zu lassen. Bei den ersten Veranstaltungen waren die Technischen Hochschulen Darmstadt, Dresden, Ilmenau und Zittau beteiligt. Im Jahr 2002 kam die Technische Universität München hinzu. Das 30igste Jubiläum zur diesjährigen Veranstaltung an der TU Ilmenau zeigt, das die damalige Initiative ein Erfolgskonzept mit inzwischen langer Tradition und Kontinuität geworden ist und heute genau wie zu Beginn den Doktoranden die Möglichkeit bietet im geschützten Raum Ihre Ergebnisse vorzustellen, sich darüber miteinander sowie mit den Professoren auszutauschen und sich zu vernetzen. Inhaltlich war und ist das Kolloquium geprägt durch Themen zu Isolierwerkstoffen und Isoliersystemen, Schaltgräten und Anlagen sowie stromführenden Kontakten und Verbindungen.



Gruppenbild vor dem Kirchhoffbau an der TU Ilmenau

Foto: FG EGA, TU Ilmenau

Am Anreisetag wurden alle durch Prof. Frank Berger und Prof. Sinzinger begrüßt. Anschließend konnten Versuchsstände im Labor besichtigt und in Vorführungen erlebt werden. Am Abend wurde sich beim gemütlichen Grillen ausgetauscht.

In den folgenden zwei Tagen stellten die Doktorand:innen ihre Forschungsergebnisse in Vorträgen und in einer Poster Session vor. Die Themen beinhalteten dabei Fragestellungen zum Verhalten und zur Modellierung von Isolierstoffsystemen, der Anlagentechnik, dem

Schalten von Gleichströmen, dem Messen von Teilentladungen bei überlagerten Spannungen, geringem Druck und alternativen Isoliersystemen.

Neben dem fachlichen Programm gab es eine Exkursion nach Oberhof mit Besichtigung der Bobbahn und Eishalle. Nach einem sportlichen Teil, dem Biathlonschießen und der anschließenden Siegerhrung der Schützenkönigin von der TU Dresden, konnten sich alle beim gemeinsamen Abendessen weiter kennenlernen. Es war eine gelungene Veranstaltung und wir freuen uns auf das kommende Jahr an der TU München.

## Projekttag des Instituts

In diesem Jahr führte der Projekttag am 22.09.23 die Kolleginnen und Kollegen des Institutes an die Talsperre Malter. Während der Führung bei nasskaltem Wetter konnten die technischen Eigenschaften der 1913 in Betrieb genommenen Talsperre bestaunt und diskutiert werden. Neben der eigentlichen Staumauer wurde die neue Überlauftrinne für den verbesserten Hochwasserschutz besichtigt. Zudem konnten Einblicke in die unterirdischen Tunnel gewonnen werden. Diese sind Teil des Bypasssystems gegen den Überlauf der Staumauer und des angeschlossenen Wasserkraftwerkes. Ebenso beeindruckend war der Schachteingang, der über eine Gittertreppe mehr als 30 m in die Tiefe bis zur Schachtohle führt – nichts für schwache Nerven.

Nach der Führung wurde die persönliche Energie am italienischen Buffet unweit der Talsperre mit Blick auf das Staubecken wieder aufgefüllt. Der Ausklang des Tages fand am Institut statt. Bei Bratwurst, Grillkäse und kühlen Getränken machte sogar der Regen eine Pause und es konnte das fröhliche Miteinander gelebt werden.



Impressionen von der Talsperre Malter und der Grillveranstaltung

Fotos: IEEH

## Semesterauftaktveranstaltung „The Great RES-ET“

Am 13. Oktober 2023 wurde die Veranstaltung "The Great RES-ET" auf der Freifläche der Hochspannungshalle des Instituts für elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik (BIN) durchgeführt. Die Veranstaltung begann um 17 Uhr und bot eine hervorragende Gelegenheit, das neue Semester gemeinsam, in einer lockeren Atmosphäre mit kostenloser Teilnahme, Essen, Getränken und Musik für alle Teilnehmer, zu starten.



Bühnenaufbau beim „The Great RES-ET“

Foto: Ricardo Herrmann

Die Veranstaltung zog eine beeindruckende Teilnehmerzahl von 80 Personen an, darunter Mitarbeiter der Professuren für Elektroenergieversorgung, Hochspannungstechnik, elektrische Maschinen und Antriebe sowie Leistungselektronik. Sowohl Studierende in der Vertiefung Elektroenergietechnik als auch solche im Grundstudium waren vertreten.

Die Teilnehmer wurden während der Veranstaltung mit Getränken und Speisen versorgt, die vor Ort von engagierten Mitarbeitern gegrillt und vorbereitet wurden. Diese kulinarische Versorgung schuf eine entspannte Atmosphäre für den akademischen Austausch zwischen Studierenden und wissenschaftlichen Mitarbeitern. Diskussionen über Lehre, Forschung und zukünftige Perspektiven für Absolventen bildeten einen wichtigen Teil der Veranstaltung. Parallel dazu erhielten die Teilnehmer die Gelegenheit zu Laborführungen in verschiedenen Einrichtungen des Instituts. Das Dynamische Netzmodell der Professur Elektroenergieversorgung, die Hochspannungshalle der Professur für Hochspannungstechnik und das Labor der Professur Leistungselektronik wurden besichtigt. Hier erhielten die Studierenden Einblicke in die Lehrveranstaltungen und Forschungsschwerpunkte jeder Professur, wodurch das Interesse der Studierenden im Grundstudium geweckt werden sollte.

Eine besondere Attraktion war die freie Tanzfläche neben den Laborführungen. Unterstützt von Institutsmitarbeitern wurde eine professionelle Musikanlage aufgebaut. Die Tanzfläche bot eine entspannte Möglichkeit für Studierende und Mitarbeiter, sich außerhalb der üblichen akademischen Umgebung zu treffen und auszutauschen.

Die Veranstaltung erstreckte sich bis Mitternacht. Es wird gehofft, dass die Teilnehmer nicht nur informative Einblicke in die Arbeit des Instituts gewonnen haben, sondern auch Spaß hatten. Der rege Austausch zwischen Studierenden und wissenschaftlichen Mitarbeitern dürfte zu einer bereichernden Erfahrung für alle Beteiligten geworden sein.

## TransCampus-Workshop „Challenges of Harmonic Studies in Modern Transmission Systems“

Aktuell werden harmonische Analysen und Studien insbesondere für Übertragungsnetzbetreiber immer wichtiger, u.a. um die Störaussendung von Kundenanlagen sachgerecht zu koordinieren und zu begrenzen. Im Rahmen der Energiewende ist zusätzlich mit dem Anstieg umrichterbasierter Anlagen und einem zunehmenden Verkabelungsgrad der Netze zu rechnen. Dies wirkt sich sowohl auf die Störpegel im Netz als auch auf die harmonische Netzimpedanz (bspw. durch Resonanzen) aus. Eine wesentliche Grundlage für solche Analysen und Studien sind zuverlässige frequenzabhängige Simulationsmodelle der Netze, in denen alle Elemente ausreichend detailliert modelliert sind. Die Erstellung der entsprechenden Modelle stellt eine große Herausforderung dar.

Im Rahmen des TransCampus-Programms (<https://transcampus.eu>), zur Förderung der Zusammenarbeit zwischen dem King's College London (KCL) und der TU Dresden (TUD), wurde ein Workshop vom 8. bis 9. November 2023 in Dresden organisiert. Unter dem Thema „Challenges of Harmonic Studies in Modern Transmission Systems“ wurde der Fokus auf die Modellierung unterlagerter Verteilungsnetze für harmonische Simulationen im Übertragungsnetz gesetzt. Damit wurde für mehr als 40 internationale Teilnehmer aus Wissenschaft und Industrie eine Plattform geboten, sich auf diesem Gebiet über Ergebnisse aktueller Projekte auszutauschen und künftige Anforderungen und Herausforderungen zu diskutieren.



Erster Tag des Workshops

Foto: Morteza Pourarab

Die Vorträge der sechs Gastredner (u.a. aus England, den Niederlanden und der USA) befassten sich mit Themen der Standardisierung, sowie der Modellierung und Messung von

harmonischen Verzerrungen in Übertragungsnetzen. Außerdem wurden die Ergebnisse aus dem von Dr.-Ing. Grazia Todeschini (KCL) und Prof. Jan Meyer (TUD) initiierten Projektes zur Modellierung unterlagerter Verteilungsnetze vorgestellt. Die historische Stadtführung in der Dresdener Altstadt und das gemeinsame Abendessen boten eine perfekte Gelegenheit für geselligen Austausch und das Knüpfen neuer Kontakte. Unser Dank gilt allen Helfer:innen.

## Interne Workshopreihe Softwareanwendungen

Im Sommer/Herbst dieses Jahres wurde erstmalig eine interne Workshopreihe für alle Mitarbeitenden des Instituts organisiert. Sie stand unter dem Motto Mitarbeiter:innen schulen Mitarbeiter:innen. In der Workshopreihe wurden Grundlagen zu verschiedenen Software-Tools und Verfahren im Kontext des wissenschaftlichen Arbeitens vermittelt. Um eine interaktive Teilnahme zu ermöglichen und die gezeigten Inhalte live nachvollziehen zu können wurden die Workshops als Webinar durchgeführt. Im ersten Teil stellte Sasan Rasti die folgenden grundlegenden Themen vor:

1. Visual Studio Code (Einrichtung, Funktionsumfang)
2. Python (Plugins, Best Practice, Jupyter Notebooks)
3. LaTeX (Plugins, Best Practice)
4. Git (Theorie und Anwendung)
5. Gitlab (Funktionsumfang)
6. Github (Funktionsumfang)
7. Docker (Theorie und Anwendung)
8. Continuous Integration & Continuous Deployment (Theorie und Anwendung)

Im Anschluss an den ersten Teil der Workshopreihe wurden weitere Termine zu anwendungssoftwarespezifischen Themen durchgeführt. An dieser Stelle sei insbesondere auf die mittlerweile mehrjährige Entwicklung zweier Open-Source Toolboxes verwiesen:

1. IEEH Power System Data Model  
<https://github.com/ieeh-tu-dresden/power-system-data-model>
2. IEEH PowerFactory Tools  
<https://github.com/ieeh-tu-dresden/powerfactory-tools>

Das **IEEH Power System Data Model** (kurz PSDM) ist für die Beschreibung elektrischer Energiesysteme erdacht. Es bietet eine hierarchische Struktur respektive ein Schema zur Beschreibung eindeutiger Entitätsbeziehungen von Netzelementen sowie von Parametersätzen. Der Programmcode ist in Python umgesetzt und zeichnet sich durch eine stringente Typisierung aus, was dem komfortablen Einsatz in anderen Code-Bibliotheken zugutekommt. Das PSDM fußt auf drei Säulen, welche zusammen ein aktuelles Netzabbild beschreibbar machen:

- Topology: „harte“ Betriebsmitteldaten und Charakteristiken
- TopologyCase: Schaltzustände und Nichtverfügbarkeiten
- SteadstateCase: Arbeitspunkt des Netzes (bspw. Lastzustände und Regler)

Die **IEEH PowerFactory Tools** sind für eine externe Nutzung (engine mode) des Leistungsflussberechnungsprogramms DigSILENT PowerFactory vorgesehen. Dazu wird die vom Programm zur Verfügung gestellte Python-PowerFactory-API verwendet. Es werden drei grundlegende Anwendungsbereiche abgedeckt:

- Export von berechnungsrelevanten Netzdaten aus einem PowerFactory-Projekt in das IEEH Power System Data Model (Ablage als JSON)
- Steuerung von PowerFactory (umfangreiche Komfortfunktionen vorhanden)

Import von externen Netzdaten in die PowerFactory-Umgebung (geplant)

# Kontakt

## Anfahrtsskizze

Sitz des Institutes:

Mommsenstraße 10/12 (Binderbau/Toeplerbau)  
Sekretariate: BIN 124/125  
01069 Dresden



So finden Sie zu uns:

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

## Weitere Kontaktmöglichkeiten

Auf unserer IEEH-Repräsentanz auf LinkedIn informieren wir ganzjährig über neue Projektstarts, Konferenzteilnahmen, Forschungsdienstleistungen und relevante Ereignisse.



IEEH-Repräsentation LinkedIn  
<https://linkedin.com/company/tu-dresden-ieeh/>

Informieren Sie sich gerne auch auf unserer Website, hier finden Sie zudem die digitalen Versionen des Jahresberichtes als Download.



Website des IEEH (Jahresberichte als Download)  
<https://tud.link/wbl7>



