

Jahresbericht 2022

INSTITUT FÜR ELEKTRISCHE ENERGIEVERSORGUNG
UND HOCHSPANNUNGSTECHNIK



Vorwort

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

mit dem vorliegenden Jahresbericht 2022 möchten wir Sie über Neuigkeiten, wichtige Ereignisse und aktuelle Aktivitäten in der Forschung und der Lehre am Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik (IEEH) und der TU Dresden informieren.

Nach einem längeren internen Prozess hat sich die Leitung der TU Dresden entschieden die drei vakanten Professuren der elektrischen Energietechnik als Leuchtturmausschreibung neu zu besetzen. Neben der bestehenden Professur für Leistungselektronik wird es zukünftig eine Professur für Komponenten Intelligenter Energienetze (bisher: Professur für Hochspannungs- und Hochstromtechnik), eine Professur für Elektrische Maschinen und Antriebe (unveränderte Widmung) und die Professur für Vernetzte Energiesysteme (bisher: Professur für Elektroenergieversorgung) geben. Die Bewerbungsfrist endete Anfang Oktober. Es ist geplant, dass die neuen Professor:innen ab dem Wintersemester 2023 die jeweilige Lehrstuhlleitung übernehmen.

Darüber hinaus wurde Herr Dr.-Ing. habil. Jan Meyer als außerplanmäßiger Professor auf dem Fachgebiet Power Quality berufen. Wir gratulieren Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Jan Meyer herzlich hierzu. Die dargestellte Entwicklung unterstreicht die zentrale Bedeutung des Fachgebiets der elektrischen Energietechnik in Lehre und Forschung an der TU Dresden.

Die wachsende Dezentralisierung der elektrischen Energietechnik und die Innovationen auf dem Gebiet der Leistungselektronik eröffnen neue und erweitern bestehende Forschungsfelder. Um zukünftig die Mittel- und Niederspannungsnetze teil- oder vollautomatisiert betreiben zu können, sind grundlegende neue Funktionen erforderlich. So werden zum Beispiel im Rahmen des Projektes DigiTechNetz - Digitalisierungstechnologien für die Betriebsführung von Niederspannungsnetzen - Konzepte für eine zukünftige Betriebsführung gemeinsam mit lokalen Projektpartnern aus Industrie und Wirtschaft abgeleitet und eine Felderprobung durchgeführt. Auch die Aktivitäten im Bereich der DC-Niederspannungsnetze wurden mit einem neuen Projekt ausgebaut. Im Bereich der elektrischen Komponenten wurde zusammen mit Partnern der TUD, dem Fraunhofer Institut und der Industrie das IGF-Leitetechnologieprojekt zur Energiewende AmpereClimb gestartet. Damit wird die interdisziplinäre Zusammenarbeit im Bereich der stromführenden Verbindungen mit der Werkstofftechnik und des Maschinenbaus weiter intensiviert. Themen wie z. B. umweltfreundliche Isoliergase, elektrischen Isoliersystemen für Maschinen in unterschiedlichen Anwendungen und Fragen zur Erwärmung elektroenergie technischer Anlagen zeigen den Bedarf in diesen Bereichen.

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

Durch zahlreiche Veröffentlichungen und Patentanmeldungen wurde der wissenschaftliche Austausch mit anderen Forschungseinrichtungen und der Technologietransfer intensiviert. In diesem Jahresbericht erhalten sie durch die Kurzberichte der wissenschaftlichen Mitarbeiter:innen einen Überblick zu den sehr unterschiedlichen Forschungsaktivitäten. Hervorzuheben ist, dass einige Mitarbeiter:innen für Ihre exzellenten Forschungsergebnisse mit hochrangigen Auszeichnungen prämiert wurden.

Die exzellenten wissenschaftlichen Leistungen sind Ergebnis einer engagierten und kollegialen Zusammenarbeit der Mitarbeiter:innen im wissenschaftlichen, administrativen und technischen Bereich. Dafür bedanken wir uns herzlich bei allen Kollegen:innen.

Im Bereich der Ingenieurwissenschaften haben sich die Immatrikulationszahlen an der TU leider weiter reduziert. Dies betrifft auch die Fakultäten Elektrotechnik und Informationstechnik. Dadurch wird es immer problematischer den wissenschaftlichen Nachwuchs sicherzustellen. Darüber hinaus hat die Industrie erhebliche Probleme das notwendige Personal für die zahlreichen Projekte im Rahmen der Energiewende zu akquirieren. Die im letzten Jahr aufgenommenen Bemühungen, Schulabgänger:innen für ein Ingenieurstudium zu begeistern, wurden weiter intensiviert, zeigen aber bisher bedauerlicherweise keinen durchschlagenden Erfolg.

Um in der Lehre den Bezug zur Praxis zu erhalten und aktuelle wissenschaftlich-technische Themen zu vermitteln, konnten wir wieder für ausgewählte Vorlesungen auf die Erfahrungen und das Expertenwissen externer Fachleute zurückgreifen. Hierfür möchten wir uns herzlich bei Herrn Hon.-Prof. Dr. Konstantin Papailiou, Herrn Dipl.-Ing. Matthias Kudoke sowie 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.

Ein besonderer Dank gilt auch den ehemaligen Mitarbeiter:innen unseres Instituts, Dr. Hartmut Bauer, Dr. Eberhard Engelmann, Prof. Steffen Großmann, Dr. Helmut Löbl und Dr. Joachim Speck. Sie haben uns wieder mit Rat und Tat unterstützt.

Diesen Jahresbericht nehmen wir zum Anlass, allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts, Freunden und Partnern für ihre tatkräftige Mitarbeit und Unterstützung zu danken. Wir wünschen ihnen ein gesundes, erfolgreiches und frohes Jahr 2023 und freuen uns auf die weitere intensive Zusammenarbeit.

Dresden, Dezember 2022



Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner



PD Dr.-Ing. habil. Stephan Schlegel

Inhaltsverzeichnis

Personelle Besetzung	5
Lehrstuhl Elektroenergieversorgung.....	5
Lehrstuhl Hochspannungs- und Hochstromtechnik.....	7
Labor und Werkstatt	9
Lehre	10
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	15
Studentischer Newsletter.....	17
Forschung	18
Lehrstuhl Elektroenergieversorgung.....	19
Forschungsschwerpunkte und Forschungsprojekte	19
Publikationen	68
Lehrstuhl Hochspannungs- und Hochstromtechnik.....	74
Forschungsschwerpunkte und Forschungsprojekte.....	74
Publikationen	108
National Arc fault Research Center.....	112
Preise und Auszeichnungen	114
Promotionen	117
Kooperationen	125
Kooperationen National	125
Wissenschaftskooperationen	125
Industriekooperationen	125
Kooperationen International	127
Wissenschaftskooperationen	127
Industriekooperationen	127
Kommissions- und Gremienarbeit.....	129
Lehrstuhl Elektroenergieversorgung.....	129
Lehrstuhl Hochspannungs- und Hochstromtechnik.....	130
Veranstaltungen	131
Kontakt	143
Titelbild:	„Schutzengel“-Erscheinung bei einem Experiment zur Auswirkung von Niederspannungs-Wechselstrom-Lichtbögen auf die persönliche Schutzausrüstung von Elektromonteuren.
Foto:	Herr Dipl.-Ing. Ricardo Herrmann

Personelle Besetzung

Lehrstuhl Elektroenergieversorgung

Titel	Nachname	Vorname	Telefon (0351-463-)
<i>Leiter der Professur</i>			
Prof. Dr.-Ing.	Schegner	Peter	34374
<i>Professoren und Hochschullehrer im Ruhestand</i>			
Dozent Dr.-Ing.	Bauer	Hartmut	
<i>Professoren, Dozenten und Lehrbeauftragte</i>			
Dr.-Ing.	Berger	Frank	
Hon.-Prof. Dr.-Ing.	Hable	Matthias	
Hon.-Prof. Dr.-Ing.	Hentschel	Gert	
Prof. Dr.-Ing. habil.	Meyer	Jan	35102
Prof. Dr.-Ing.	Meyer	Jörg	
Dipl.-Ing.	Schindler	Jörg	
Dr.-Ing.	Stachel	Philipp	
<i>Sekretärin</i>			
	Sprotowsky	Corinna	33202
<i>Projektkoordinator</i>			
Dipl.-Ing.	Keller	Jan	35432
<i>Wissenschaftliche Mitarbeiter:innen</i>			
Dr.-Ing.	Blanco	Ana Maria	32482
Dipl.-Ing.	Bruhns	Michael	35088
Dipl.-Ing. (FH)	Dabow	Jonas	bis 06/2022
Dr.-Ing.	Domagk	Max	35223

Personelle Besetzung

Titel	Nachname	Vorname	Telefon (0351-463-)
Dipl.-Ing.	Fiedler	Laura	ab 10/2022
Dipl.-Ing.	Frowein	Karla	37869
Dipl.-Ing.	Gasch	Etienne	43206
Dipl.-Ing.	Herrmann	Ricardo	40764
M. Sc.	Jäschke	Christian	35353
M. Sc.	Kannan	Shrinath	bis 09/2022
Dipl.-Ing.	Kaufhold	Elias	43201
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
M. Sc.	Nilges	Matthias	40438
M. Sc.	Peng	Zhiyuan	bis 07/2022
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

Technische Angestellte

Lemke	Gunter	35272
-------	--------	-------

Lehrstuhl Hochspannungs- und Hochstromtechnik

Titel	Nachname	Vorname	Telefon (0351-463-)
<i>Kommissarischer Leiter der Professur</i>			
PD 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	
Dipl.-Ing.	Kudoke	Matthias	
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
Dr.-Ing.	Backhaus	Karsten	bis 03/2022
Dipl.-Ing.	Büttner	Lukas	33005
M. Sc.	Dowbysch	Andreas	40522
Dipl.-Ing.	Elspaß	Lena	40517
Dipl.-Ing.	Gödicke	Markus	40516
Dr.-Ing.	Götz	Thomas	40519
Dr.-Ing.	Hildmann	Christian	33917
M. Sc.	Hoffmann	Johannes	seit 06/2022
Dr.-Ing.	Israel	Toni	bis 08/2022
M. Sc.	Kiefer	Jörg	40516
Dipl.-Ing.	Linde	Thomas	40520
Dipl.-Ing.	Linke	Johanna	40518
Dipl.-Ing.	Pampel	Hans-Peter	33103
Dipl.-Ing.	Pomsel	Michelle	34756
Dipl.-Ing.	Schindler	Alexander	seit 10/2022
Dipl.-Ing.	Schladitz	Markus	33080
Dipl.-Ing.	Sokolowski	Michal	40523
Dipl.-Ing.	Ullrich	Moritz	seit 12/2022

Technische Angestellte

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

Labor und Werkstatt

Nachname	Vorname	Telefon (0351-463-)
Dittrich	Ralf	34745
Dipl.-Ing. (FH) Eusewig	Falk	40608
Gläser	Michael	34757
Jarosczyński	Gerd	34745
Knorrn	Jan-Erik	34260
Knüpfel	Helge	34260
Pöche (Auszubildender)	Felix	34260
Reichelt	Eric	34745

Lehre

Lehrveranstaltungen

Lehrveranstaltungen für das Grundstudium

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

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 Energieversorgungssysteme</i>		
Betriebsmittel und Berechnungsgrundlagen für elektrische Energieversorgungssysteme <i>Prof. Schegner</i>		2/1/0
Grundlagen der Elektroenergieanlagen <i>Prof. Schegner</i>		1/1/0
<i>Modul Betrieb elektrischer Energieversorgungssysteme</i>		
Betrieb elektrischer Energieversorgungssysteme <i>Prof. Schegner</i>	2/1/0	
Praktikum I: Elektroenergiesysteme	0/0/1	
Praktikum II: Hochspannungstechnik 2	0/0/1	
<i>Modul Oberseminar Elektrische Energieversorgung</i>		
Oberseminar Elektrische Energieversorgung <i>Prof. Schegner / PD Dr. Schlegel</i>		0/2/0

Vorlesungen / Übungen / Praktika	SS	WS
<i>Modul Netzintegration, Systemverhalten und Versorgungsqualität</i>		
Betriebsvorgänge in Energieversorgungssystemen <i>Prof. Schegner</i>	2/1/0	
Grundlagen der Versorgungsqualität <i>Prof. Jan Meyer</i>	1/1/0	
Komplexpraktikum zum Netzbetrieb	0/0/1	
<i>Modul Planung elektrischer Energieversorgungssysteme</i>		
Netzplanung <i>Prof. Schegner / Prof. Hable</i>	1/1/0	
Elektroenergieanlagenprojektierung <i>Prof. Schegner / Prof. Hentschel</i>	1/1/0	
Netzberechnung <i>Prof. Schegner</i>	2/1/0	
<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. Schegner</i>		2/1/0
Leittechnik <i>Prof. Schegner / Dipl.-Ing. Schindler</i>		1/1/0
Praktikum Sekundärtechnik		0/0/1
<i>Modul Experimentelle Hochspannungstechnik</i>		
Experimentelle Hochspannungstechnik <i>PD Dr. Schlegel / Dipl.-Ing. Pampel</i>		4/0/0
Praktikum Experimentelle Hochspannungstechnik		0/0/2

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

Lehrexport an andere Fakultäten – Grundstudium

Vorlesungen / Übungen / Praktika	SS	WS
Hochspannungs- und Hochstromtechnik (für Wirtschaftsingenieure) <i>PD Dr. Schlegel</i>		2/1/1
Elektrotechnische Systeme im Maschinenbau bis SS20 <i>Prof. Großmann</i>		2/1/0
Grundlagen der Elektrotechnik (VNT und WW) ab WS20/21 (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. Schegner</i>	0/0/1	3/1/0
Elektroenergietechnik (für Lehramt an berufsbildenden Schulen) <i>Prof. Schegner</i>	0/0/1	3/1/0
Elektroenergietechnik (für Lehramt an Oberschulen WTH) <i>Prof. Schegner</i>		1/1/1
Einführungsseminar Elektroenergietechnik (für Lehramt an Oberschulen WTH) <i>Prof. Schegner</i>	2/0/0	

Studentische Arbeiten

Studienarbeiten und Forschungspraktika

Barriuso Gutierrez, Sofia

Analysis of the impact of voltage harmonics on the DC component of the grid-side currents of single-phase rectifiers

12/2021 (Betreuer: Dipl.-Ing. Kaufhold)

Effler, Moritz

Untersuchungen zum Kontaktverhalten umformtechnischer Fügeverbindungen bei Fehlerströmen

14/2021 (Betreuer: M.Sc. Kiefer)

Fuchs, Wilhelm Alexander

Untersuchung von Schutzkonzepten in Hochstromanlagen

15/2021 (Betreuer: Dipl.-Ing. Bruhns)

Melnychuk, Olga

Einfluss verschiedener Fügeelemente auf den Kraftabbau in Schraubenverbindungen mit Stromschienen

16/2021 (Betreuerin: Dr.-Ing. Oberst)

Ullrich, Moritz

Zustandsbewertung von Ladesteckverbindungen für elektrisch angetriebene Fahrzeuge

17/2021 (Betreuer: Dr.-Ing. Israel)

Gilliam, Phillip

Analysis of harmonic propagation in public low-voltage networks in presence of resonances

18/2021 (Betreuer: M.Sc. Kannan)

Perez Lagunas, Hugo

Development of evaluation methods for the classification of hazards in electrical installations in the case of high-current arcing faults in low-voltage systems

19/2021 (Betreuer: Dipl.-Ing. Bruhns)

Duvekot, Dennis

Vergleich der auf AC oder DC-Technologie basierenden windparkinternen elektrischen Energieübertragung

20/2021 (Betreuer: M.Sc. Nilges)

Ohrt, Friedrich

Modellierung des Ladeverhaltens von Elektrofahrzeugen im Combined Energy Lab

21/2021 (Betreuerin: Dipl.-Ing. Ma)

Huter, Max

Bestimmen des Einflusses von thermischen und mechanischen Belastungen auf die Anpresskraft von Klemmen für Weichenheizungen

22/2021 (Betreuer: Dipl.-Ing. Schladitz)

Fritzsch, Sophia

Projektierung, Parametrierung und Prüfung von neuen Distanzschutzgeräten für das Dynamische Netzmodell

01/2022 (Betreuer: Dipl.-Ing. Liebermann)

Nguyen, Thanh Binh

Überarbeitung des Praktikums „Leitungsparameter“

02/2022 (Betreuer: Dipl.-Ing. Liebermann/Dipl.-Ing. Khokhlov)

Verdugo Zúniga, Andrés Ignacio

Aufbau eines elektrischen Modells zur Berechnung des Zünd- und Löschverhaltens einer Kugelfunkenstrecke

03/2022 (Betreuer: M.Sc. Dowbysch)

Jenke, Annemarie

Analyse und Bewertung von Energieverteilungskonzepten am Beispiel städtischer Verteilnetze unter Berücksichtigung neuer Technologien

04/2022 (Betreuer: Dipl.-Ing. Krahmer)

Peine, Jennifer

Prüfen von Isoliersystemen für Freiluftanwendungen bei Gleichspannung

06/2022 (Betreuer: Dipl.-Ing. Pampel)

Urbank, Johann

Experimentelle Untersuchung der Einflussgrößen auf das Zeitverhalten von Störlichtbögen in Niederspannungsschaltanlagen

07/2022 (Betreuer: Dipl.-Ing. Bruhns)

Köhler, Konrad

Untersuchungen zum Langzeit- und Alterungsverhalten umformtechnischer Fügeverbindungen unter der Berücksichtigung hoher Kurzzeitströme

08/2022 (Betreuer: M.Sc. Kiefer)

Krpeciar, Ondrej

Entwicklung einer Anordnung zur Bestimmung der Empfindlichkeit moderner Leuchtmittel gegenüber Spannungsschwankungen, Zwischen- und Supraharmonische

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

Mao, Xinpeng

KI-basierte Zeitreihenanalyse für verschiedene Modalkomponenten im Rahmen der Stabilitätsbewertung

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

Diplom- und Masterarbeiten

Grünberg, Christoph

Erarbeitung eines Modells zur Berechnung von Impedanzen von Freileitungen über einem geschichteten Erdreich

06/2021 (Betreuer: Dipl.-Ing. Liebermann)

Schill, Lisa Maria

Untersuchen der Eignung einer Feldmühle zum Bestimmen der Oberflächenfeldstärkeverteilung an MVDC-Kabelenden

09/2021 (Betreuer: Dr.-Ing. Backhaus)

Gommlich, Franz

Entwicklung einer Betriebsstrategie für Winderzeugungszellen kombiniert mit PV- und Batterieanlagen

10/2021 (Betreuer: Dipl.-Ing. Rasti)

Nguyen, Nhat Nam

Simulative Analyse der Nichtlinearität der spannungsabhängigen Oberschwingungsemission von leistungselektronischen Geräten

11/2021 (Betreuer: Dipl.-Ing. Müller)

Wittkemper, Eva

Wissenschaftliche Bewertung von Maßnahmen für die Kurzschlussstrombegrenzung in Hochspannungsnetzen

12/2021 (Betreuer: Dipl.-Ing. Kreutziger)

Schilling, Maximilian

Grundlagenuntersuchung zum Ablauf der Diffusion an Schmelzsicherungen in PV-Anwendungen

13/2021 (Betreuer: Dipl.-Ing. Büttner)

Meinck, Moritz

Entwicklung eines Modells zur Untersuchung des dynamischen Löschverhaltens von sekundären Lichtbögen im Zeitbereich

14/2021 (Betreuer: Dipl.-Ing. Liebermann)

Fiedler, Laura

Entwicklung eines Transformator-Modells in natürlichen Größen und Integration in ein Netzbe-rechnungsprogramm

16/2021 (Betreuer: Dipl.-Ing. Schmidt)

Favresse, Vivian

Netzstützender und -bildender Betrieb eines Stromrichters im Vergleich zu konventionellen Syn-chronogeneratoren

01/2022 (Betreuer: M.Sc. Nilges)

Sun, Xiaowen

Erarbeitung eines Modells zur Berechnung der Nullimpedanz von Freileitungen unter Berücksich-tigung der endlichen Leitungslänge und Zusatzwiderständen an den Erdungspunkten von Erdsei-len

02/2022 (Betreuer: Dipl.-Ing. Liebermann)

Hartmann, Nick

Entwicklung eines Algorithmus zur Aggregierung von energetischer Flexibilität mittels Machine-Learning-Verfahren unter Berücksichtigung des elektrischen Netzes

03/2022 (Betreuer: Dipl.-Ing. Rasti)

Schindler, Alexander

Untersuchen des Teilentladungs- und Alterungsverhaltens fester Isolierstoffe bei Belastung mit harmonisch verzerrten Spannungen

04/2022 (Betreuer: Dipl.-Ing. Linde)

Ullrich, Moritz

Kurzzeitstrombelastung von Steckverbindungen für die Elektromobilität

06/2022 (Betreuer: Dipl.-Ing. Pomsel/Dr.-Ing. Israel)

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 yanan.zhang@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.

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.



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



[https://www.researchgate.net/lab/
Peter-Schegner-Lab-3](https://www.researchgate.net/lab/Peter-Schegner-Lab-3)



[https://www.researchgate.net/lab/High-
Voltage-Laboratory-at-Technische-Universitaet-
Dresden-Steffen-Grossmann](https://www.researchgate.net/lab/High-Voltage-Laboratory-at-Technische-Universitaet-Dresden-Steffen-Grossmann)

Lehrstuhl Elektroenergieversorgung

Forschungsschwerpunkte und Forschungsprojekte

Die elektrische Energieversorgung verändert sich zurzeit grundlegend. 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

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 Netzzrückwirkungen
- 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 Übertragungsstrecken 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.

Untersuchung von Resonanzen in einem Kalibriersystem für Stromsensoren bis 150 kHz

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Zurzeit wird ein System zur Kalibrierung von energietechnischen Stromsensoren bis zu Frequenzen von 150 kHz entwickelt [1]. Um dessen Verhalten vorherzusagen, wurde das Kalibriersystem simulativ gemäß dem Ersatzschaltbild in Bild 1 abgebildet. Die parasitären Elemente des Transformators und die in [1] vorgesehenen Kompensationsanlagen sind dabei noch nicht berücksichtigt, da von ihnen noch keine Modellparameter vorliegen.

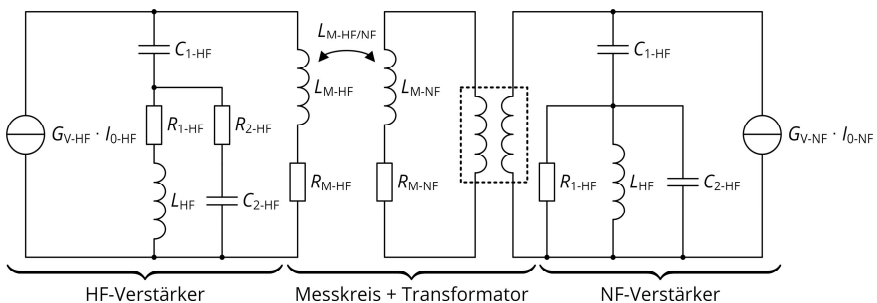


Bild 1: Betrachtetes elektrotechnisches Ersatzschaltbild des Kalibriersystems

Von den beiden Leistungsverstärkern hat der Hersteller die Frequenzgänge G_{V-HF} und G_{V-NF} , sowie die dargestellten Ersatzschaltbilder für den inneren Ausbau bereitgestellt. Die einzelnen Komponenten des Kalibriersystems wurden, wie in [2] beschrieben, durch Deskriptor-Teilsysteme abgebildet und zu einem Gesamtsystem gekoppelt.

Wie der daraus berechnete Frequenzgang in Bild 2 zeigt, treten im Kalibriersystem innerhalb des Frequenzintervalls [10 Hz, 500 kHz] drei Resonanzen auf. Vor allem die erste Resonanz bei 2 kHz ist problematisch, da diese in dem Frequenzintervall ist, in dem das Kalibriersystem eingesetzt werden soll.

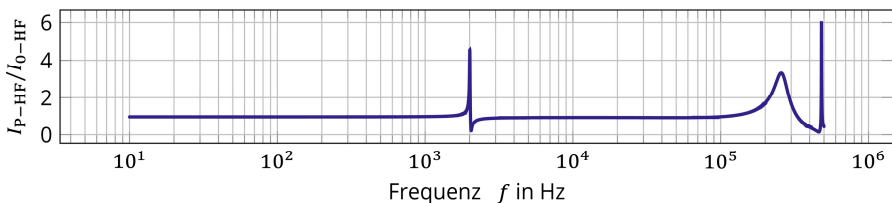


Bild 2: Frequenzgang der HF-Stromsumme I_{P-HF} in Relation zum erzeugten Strom I_{0-HF}

Um Gegenmaßnahmen ergreifen zu können wurde daher untersucht, welche Elemente des Ersatzschaltbildes in Bild 1 für die einzelnen Resonanzen verantwortlich sind. Die Resonanz mit der höchsten Frequenz (481 kHz) entsteht durch den Frequenzgang der HF-Stromquelle, was daran erkennbar ist, dass sie verschwindet wenn G_{V-HF} frequenzunabhängig zu „1“ gesetzt wird. Um den Einfluss der verschiedenen Ersatzschaltbildelemente auf die erste und zweite Resonanz zu bestimmen, wird das systembeschreibende Deskriptorsystem

$$\mathbf{E}_G \cdot \frac{d\mathbf{z}_G}{dt} = \mathbf{F}_G \cdot \mathbf{z}_G + \mathbf{G}_G \cdot \mathbf{u} \quad (1)$$

durch eine Äquivalenztransformation in ein Zustandsraummodell und ein algebraisches Gleichungssystem der Form

$$\begin{pmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{N} \end{pmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{w} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{w} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{D} \end{pmatrix} \cdot \mathbf{u} \quad (2)$$

$T_1 \cdot E_G \cdot T_r \quad T_r^{-1} \cdot \frac{dz_G}{dt} \quad T_1 \cdot F_G \cdot T_r \quad T_r^{-1} \cdot z_G \quad T_1 \cdot G_G \cdot T_r$

überführt. Das Zustandsraummodell beschreibt dabei das dynamisches Verhalten und die Resonanzen des Systems. Wird dieses durch eine Modaltransformation in seine Eigenschwingungen zerlegt, quantifiziert das Eigenvektorpaar des zur jeweiligen Resonanz gehörenden Eigenwertpaares $\underline{\lambda}_v = \underline{\lambda}_\xi^*$ die Anteile, die die einzelnen Zustandsgrößen in $\mathbf{x}$ auf die jeweiligen Eigenschwingungen haben. Durch die Modalmatrix $\mathbf{T}_M$ und $\mathbf{T}_r$ werden mit

$$(\underline{v}_{z\lambda 1} \quad \underline{v}_{z\lambda 2} \quad \dots) = \mathbf{T}_r^T \cdot \mathbf{T}_M \quad \mathbf{T}_r = (\mathbf{T}_r^I \quad \mathbf{T}_r^F) \quad (3)$$

die Anteile $\underline{v}_{z\lambda v} = \underline{v}_{z\xi v}^*$ der einzelnen Deskriptorgrößen in $\mathbf{z}_G$ auf die betrachtete Eigenschwingung bestimmt.

Zur Untersuchung der ersten beiden Resonanzen in Bild 2 werden bei der jeweiligen Resonanzfrequenz die zu den entsprechenden Eigenschwingungen gehörenden Vektoren $\underline{v}_{z\lambda v} = \underline{v}_{z\xi v}^*$ berechnet. Anschließend wird der Betrag der Vektoren bestimmt und der resultierende Vektor auf sein größtes Element normiert. Als Einflussgrößen der Resonanzen werden nun die Ströme bzw. Spannungen in $\mathbf{z}_G$ betrachtet die den Energieinhalt der Induktivitäten bzw. Kapazitäten beschreiben und die zugehörigen Elemente des normierten Vektors als Einflusskoeffizienten interpretiert. Diese sind in Bild 3 und 4 dargestellt und zeigen, dass die 2 kHz-Resonanz maßgeblich von L_{M-NF} und C_{1-NF} und die 272 kHz-Resonanz vor allem von L_{M-HF} und C_{2-HF} bestimmt wird.

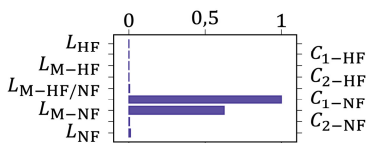


Bild 3: Einflusskoeffizienten der 2 kHz-Resonanz

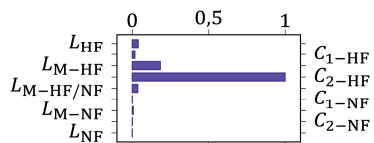


Bild 4: Einflusskoeffizienten der 272 kHz-Resonanz

[1] Jäschke, C.: "Entwicklung eines Kalibriersystems für Stromsensoren bis 150 kHz," in "IEEH Jahresbericht 2021"

[2] Jäschke, C.: "Struktur der Modellgleichungen dynamischer linearer Systeme zur effizienten Kopplung," in "IEEH Jahresbericht 2020"

Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Planung und Betrieb von Netzen“



Karla Frowein, Dipl.-Ing.

Erdschluss-Messungen im 110-kV-Netz und Einflussgrößen auf die Harmonischen Anteile im Erdschluss- Reststrom

Erdschluss-Messungen in einem 110-kV-Netz zeigen Harmonische Anteile im Erdschluss-Reststrom $I_{RES\ v}$, die stark voneinander abweichen. Dabei wurde der Erdfehler einmal im gut vermaschten Teilnetz B und einmal in Strahlennetz A eingelegt. Weitere Parameter des Netzes wurden beibehalten.

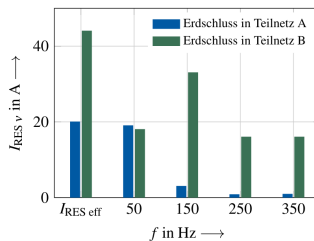


Bild 1: Erdschlussrestströme in einem Netz mit kapazitivem Erdschlussstrom $I_{CE} \approx 900$ A

Um Aussagen anhand der Erdschlussmessungen treffen zu können, wurde das Netz anhand eines Modells genauer untersucht und verschiedene Einflussgrößen wurden variiert. Dabei wurde das vermaschte Teilnetz B durch konzentrierte Elemente dargestellt, für Strahlennetz A hingegen wurden die Leitungen und untergelagerten 20-kV-Netze im Detail modelliert (s. Bild 2). Werte aus Messung und Modell stimmen gut überein (s. Bild 3), Abweichungen ergeben sich aus der Darstellung von Teilnetz B über konzentrierte Elemente.

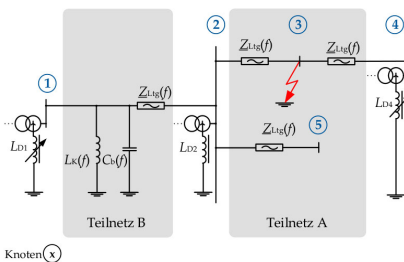


Bild 2: Vereinfachte Darstellung des betrachteten Netzes

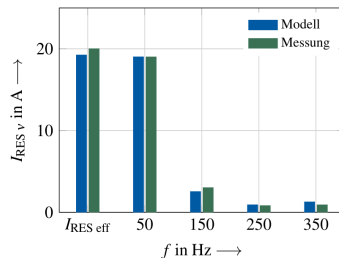
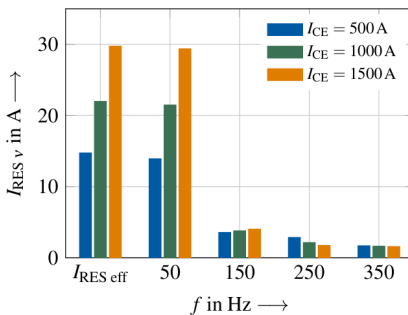
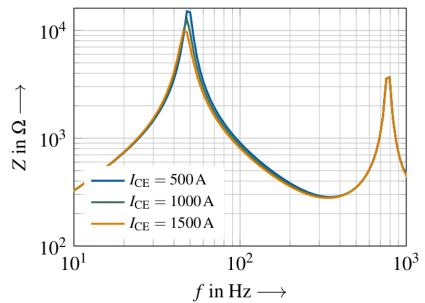


Bild 3: Berechnete und gemessene Erdschluss-Restströme $I_{RES\ v}$

Verschiedene Einflussgrößen wurden variiert. Dabei zeigt sich, dass die Netzgröße/der kapazitive Erdschlussstrom I_{CE} kaum Einfluss auf die harmonischen Anteile des Erdschluss-Reststroms $I_{RES\ v}$ hat (s. Bild 4).



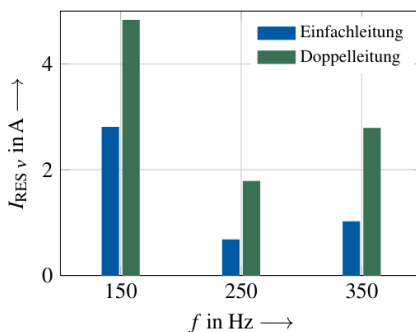
(a) Erdschlussrestströme



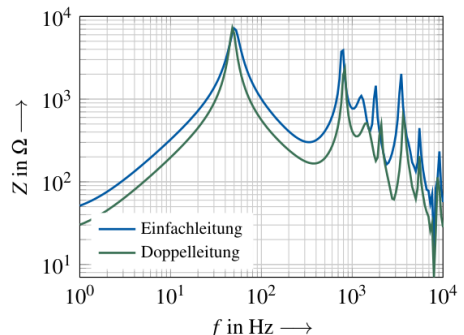
(b) Im Fehlerfall wirksame Impedanz

Bild 4: Variation der Netzgröße (I_{CE})

Einen wesentlichen Einfluss hat jedoch die Anbindung des Fehlerknotens an das Netz. Dies ist in Bild 5 zu sehen. Hier wurden alle Leitungen in Teilnetz A einmal als Einfachleitung und einmal als Doppelleitung ausgeführt. Durch die Anbindung über Doppelleitungen sinkt die am Fehlerort wirksame Impedanz ab, sodass es zu höheren harmonischen Anteilen im Erdschluss-Reststrom kommt $I_{RES\ v}$.



(a) Erdschlussrestströme



(b) Im Fehlerfall wirksame Impedanz

Bild 5: Teilnetz A mit Einfach- bzw. Doppelleitungen

Zusammenfassend gilt, dass die harmonischen Anteile im Erdschluss-Reststrom $I_{RES\ v}$ kaum von der Netzgröße sondern hauptsächlich von der Anbindung des vom Fehler betroffenen Knotens an das Netz und dem im Netz vorherrschenden harmonischen Pegeln abhängig sind.



Sebastian Krahmer, Dipl.-Ing.

Schwarzstartfähigkeit von stromrichterdominierten Elektroenergieversorgungsnetzen – marktliche Beschaffung und Anforderungen

Die fortschreitende Transformation des Elektroenergiesystems erfordert von den Netzbetreibern Anpassungen in allen Aspekten des Netzbetriebes, aber auch in den Konzepten des Netzwiederaufbaus (NWA). Gemäß aktueller EU-Vorgaben ist die Systemdienstleistung „Schwarzstartfähigkeit“ zukünftig öffentlich auszuschreiben und marktlich zu beschaffen. Im Rahmen des Scientific Advisory Project Board (SAPB) der 50Hertz Transmission GmbH wurden die Implikationen für dessen Regelzone untersucht. Der Fokus liegt hierbei insbesondere auf den Anforderungen an schwarzstartfähige Erzeugungsanlagen (sEZA), die zunächst einzelne Hochfahrnetze unter Spannung setzen und anschließend zum Verbundnetz zusammengeschaltet werden. Dies entspricht dem Bottom-Up Ansatz, da ein direktes Hochfahren des Verbundnetzes aus technischen Gründen nicht möglich ist. Zentrale qualitative Anforderungen an eine sEZA sind u. a.:

- ein Netz mittels einer Spannungsfahrt unter Spannung zu setzen,
- Wirk- und Blindleistung in ausreichendem Maße in den jeweiligen Beschaffungsregionen für Schwarzstartfähigkeit zur Verfügung zu stellen,
- sprunghafte Belastungsänderungen von Wirk- und Blindleistung beim Zuschalten von Betriebsmitteln und Verbrauchern auszuregeln,
- Kurzschlussstrom zur Verfügung zu stellen, um eine sichere Fehlerklärung zu gewährleisten und
- das Vorhandensein schwarzfallfester Kommunikation. [1]

Aggregation NWA-Vorgang muss organisatorisch und technisch umsetzbar sein - teilweise erlaubt - meist aber nur bei einem gemeinsamen Netzanschlusspunkt	Wirkleistung Mindestgröße für Bedarfsdeckung von Hochfahrnetz und Partner-KW - teilweise keine konkreten Anforderungen - i.d.R. im Bereich von 30-200 MW
Verfügbarkeit Ganzjährige Sicherstellung der Handlungsfähigkeit 60 % bis 90 % gefordert; teilweise keine Anforderungen - teilweise 100 % mittels Redundanz	Herstellung der Einsatzbereitschaft Zeitliche Anforderung an organ. und techn. Hochfahrprozess der sEZA - Forderung liegt zwischen 1 - 4 h - im Ausnahmefall bis zu 9 h
Minstdauer der Leistungserbringung sEZA gewährleistet Spannungshaltung & Lastdeckung im NWA-Netz 8 – 24 h; benötigte Primärenergie ist zu bevorraten/ abzuschichern - Absicherung sequentieller Anfahrversuche der Partner-KW	Blindleistungsstellbereich Blindleistungsbedarf von Hochfahrnetz und Partnerkraftwerken - im Bereich von [-100 ... -30] bis [20 ... 110] MVar - Ausregelung von Blindleistungssprüngen innerhalb Spannungsgrenzen

Bild 1: Ausgewählte Kriterien mit quantitativen Anforderungen an sEZA [1]

In international laufenden Ausschreibungsverfahren, dem aktuellen Stand des Beschaffungsverfahrens Schwarzstartfähigkeit der Bundesnetzagentur BK6-21-023 und anhand von Anforderungsgewichtungen deutscher Übertragungsnetzbetreiber sind diese zum Teil bereits weiter spezifiziert worden. In Bild 1 sind die Anforderungen für besonders relevante Kriterien zusammengefasst.

Als weiterer Schritt wurden Anlagentechnologien gemäß der Technologiematrix in Bild 2 bewertet. Konventionelle Anlagentypen gemäß Bild 2 erfüllen i. d. R. aufgrund ihres hohen Technologiereifegrads die meisten Anforderungen einer sEZA. Hingegen gelten besonders für neue potenzielle Anlagentypen spezifische Einschränkungen und ein höherer Nachrüstungs-/Anpassungsbedarf. Insbesondere für das Technologiefeld Hybridkraftwerke (HyKW) ist eine objektive Bewertung schwierig. Ein Hauptfaktor ist fehlende praktische Betriebserfahrung. So sind einerseits z. B. Angaben zur Bestimmung der gesicherten Leistung von HyKW nur unzureichend vorhanden. Andererseits können weiterführende Konzepte noch nicht erprobt werden. Auf Basis der dargestellten Vorarbeiten lassen sich verschiedene Optionen des NWA hinsichtlich Handlungsfähigkeit und Komplexität bewerten. Detailliertere Ausführungen dazu finden sich in [1].

		Konventionelle Anlagentypen		Potentielle Anlagentypen	
		Gasthermisches KW	Pumpspeicher-KW	Großbatteriespeicher	Hybridkraftwerk (WKA/PVA & Batterie)
Anforderungen	Gesicherte Leistung	✓	✓	✓	✗
	f(P)- und P(f)-Statik	✓	✓	✗	✗
	Netzbildend	✓	✓	✗	✗
	Kurzschlussstrombeitrag	✓	✓	!	!
	Eigenbedarfsbetrieb	✓	✓	✗	✗
	...				
		Netzkopplung mit Synchron- oder Asynchronmaschinen		Netzkopplung mit VSC-Umrichtern und Implementierung entsprechender Regelmodi erforderlich	
Legende		✓ ... vorhanden ! ... eingeschränkt ✗ ... nachrüstbar		✓ ... vorhanden ! ... eingeschränkt ✗ ... nachrüstbar	

Bild 2: Auszug aus dem Schema der Technologiematrix [1]

Als Fazit sollte die Ausschreibung der Schwarzstartfähigkeit regions- und anwendungsfall-spezifisch erfolgen und den verfügbaren Partnerkraftwerken Rechnung tragen. Netzwiederaufbauzonen sollten zur Sicherstellung einer geeigneten Beschaffung parallel ausgeschrieben werden. Das eröffnet die Möglichkeit sEZA auch aus Nachbarzonen zu nutzen, falls es in einer Zone keine, in der Nachbarzone allerdings mehrere geeignete Anlagen gibt. [1]

[1] P. Merk, S. Schulz, H. Becker, C. Hachmann, I. Hauer, S. Glaser, N. I. Hiersemann, S. Krahmer, S. Schlegel, D. Westermann und P. Schegner, "Wer startet das Netz der Zukunft nach einem Blackout?", ETG journal, 02/2022.



Matthias Nilges, M. Sc.

DC-Einspeisenetze mit einer Vielzahl an regenerativen Erzeugungsanlagen als Pendant zu konventionellen Kraftwerken

Gefördert durch:

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Im Rahmen des Forschungsprojekts AC2DC werden Verteilnetze mit ausschließlich regenerativen Erzeugungsanlagen untersucht (Bild 1a). Hierbei steht deren Transformation von AC zu DC im Fokus. Die Kernidee ist der Aufbau eines DC-Netzes, das aus den Zwischenkreisen der Frequenzumrichter bzw. PV-Module gespeist wird. Um dabei eine verlustarme Übertragung zu gewährleisten, kommen DC/DC Wandler zum Einsatz, die die Zwischenkreisspannung auf Mittelspannungsniveau anheben. Der Anschluss an das gewöhnliche AC-Netz erfolgt mit einem zentralen Umrichter. Bild 1b zeigt den Aufbau eines solchen Netzes.

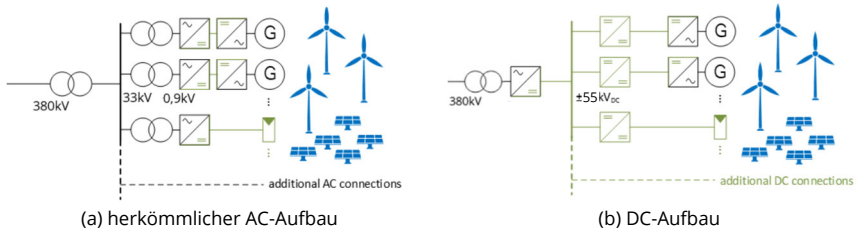


Bild 1: Transformation eines konventionellen Einspeisenetzes (a) zu einem DC-Einspeisenetz (b)

Für das Netz bietet die Anbindung durch einen zentralen Umrichter den Vorteil, dass die Vielzahl kleingliedriger regenerativer Erzeugungsanlagen aus Sicht des übergeordneten AC-Netzes wie eine einzelne große Anlage agiert. Aus Sicht des übergeordneten AC-Netzes ist die Innenimpedanz des DC-Aufbaus außerdem deutlich geringer als die eines vergleichbaren AC-Aufbaus, da keine konventionellen Transformatoren benötigt werden, die diese durch ihre Übersetzung erhöht. Durch zusätzliche Energiespeicher und regelungstechnische Verfahren kann der zentrale Umrichter zudem die Massenträgheit von Synchrongeneratoren nachahmen und damit Momentanreserven bereitstellen. Da sich auf diese Weise alle erforderlichen Systemdienstleistungen bereitstellen lassen, kann so das Verhalten eines konventionellen Kraftwerks am Hochspannungsnetz nachgebildet werden.

Da bei DC Netzen eine Blindleistungsübertragung entfällt, sind die Netzverluste üblicherweise deutlich geringer als bei vergleichbaren klassischen Topologien. Außerdem können nach [1] herkömmliche 20-kV-Mittelspannungskabelsysteme mit bis zu 55 kV DC-Spannung betrieben werden. Wird dies bei der Umwidmung bestehender Kabelstrecken berücksichtigt, werden die Komponenten bei gleicher Einspeiseleistung mit einer deutlich geringeren Auslastung, und folglich stark verringerten Verlusten, betrieben.

Um abzuschätzen, ob die reduzierten Netzverluste langfristig die höheren Investitionskosten rechtfertigen, wurde eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt. Hierbei wurde für

unterschiedlich große Onshore-Windparks der Blindleistungsbedarf und die Verluste der Kabel und Betriebsmittel im AC-Netz bestimmt und bewertet.

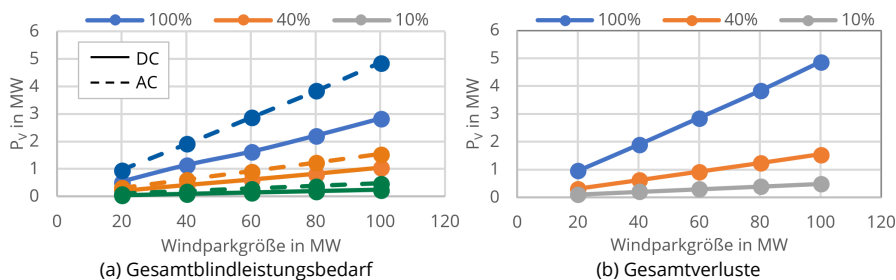


Bild 2: Gesamtblindleistungsbedarf und -verluste der Kabel, Transformatoren und Umrücker in Windparknetzen unterschiedlicher Größe in Abhängigkeit der aktuellen Einspeiseleistung

Wie Bild 2a zeigt, ändert sich der Blindleistungsbedarf mit zunehmender Einspeiseleistung von leicht kapazitiv zu stark induktiv. Bei einem Einspeisefall von 40 %, bezogen auf die installierte Leistung, kompensiert sich der Blindleistungsbedarf und das Windparknetz befindet sich im natürlichen Betrieb. Bei maximaler Einspeisung sinkt der Leistungsfaktor nicht unter $\cos \varphi = 0,98$. Entsprechend gering ist der Einfluss der Blindleistung auf die Verluste (Bild 2b). Daher ist beim Ändern der Einspeiseleistung von 10 % auf 40 % kein signifikanter Einfluss auf die Blindleistung erkennbar. Folglich sind die in Bild 3 gezeigten Verlustreduzierungen bei DC-Betrieb maßgeblich auf die höhere Systemspannung zurückzuführen.

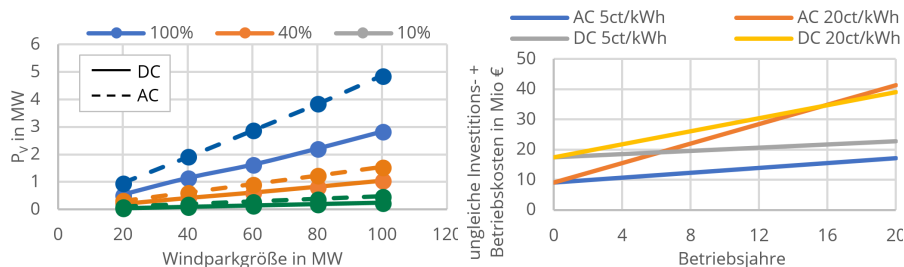


Bild 3: Vergleich der Verluste für AC- und DC-Betrieb Bild 4: Wirtschaftlichkeitsvergleich für 60 MW Windpark für verschiedene Strompreise

Zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeiten nach Bild 4 werden die Verluste über den Strompreis in Betriebskosten überführt und die jeweiligen Investitionskosten hinzuaddiert. Daraus ist ersichtlich, dass die Investitionskosten erst bei Erzeugerstrompreisen von ca. 20 ct/kWh innerhalb von 20 Jahren gedeckt werden. Demzufolge ist erst dann mit einer Wirtschaftlichkeit des DC-Konzeptes zu rechnen, wenn Systemdienstleistungen wie Momentanreserve mit eingepreist werden können oder die Investitionskosten der Komponenten sinken.

[1] M. Nilges, et. al., "Systemkonzepte von DC-Verteilnetzen: Erhöhung der Anschlussleistung von Windparks," 17. Symposium Energieinnovation 2022, Mai. 2022.

Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Power Quality“



Max Domagk, Dr.-Ing.

**Prognoseverfahren für Kenngrößen
der Strom- und Spannungsqualität**

TRÄNSNET BW

Die derzeit umgesetzten Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz und Reduzierung von CO₂-Emissionen zusammen mit dem Bedürfnis der Kunden nach betrieblicher Flexibilität führen zu einer steigenden Zahl an leistungselektronischen Geräten und Anlagen, die in den Verteilungsnetzen angeschlossen werden. Diese Entwicklung gilt in ähnlicher Weise für verbrauchende Geräte und Anlagen (z.B. Ladegeräte für Elektrofahrzeuge oder LED-Lampen), Erzeugungsanlagen (z.B. PV-Wechselrichter, Windturbinen) und Speicheranwendungen. Die nichtlineare Charakteristik dieser Geräte beeinflusst die Elektroenergiequalität (EEQ) im Netz und wirkt sich hauptsächlich auf die Spannungs- und Stromverzerrungen im Frequenzbereich bis 2 kHz (Oberschwingungen, Zwischenharmonische) sowie 2 kHz bis 150 kHz (Supraharmonische) aus.

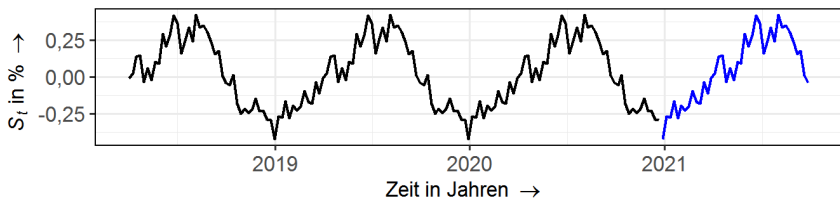
Insbesondere moderne Großstädte zeichnen sich durch eine hohe Dichte und eine schnell wachsende Zahl von Privat- und Industriekunden und folglich auch durch eine rasche Zunahme der Anzahl von leistungselektronischen Geräten aus, was zu steigenden Störpegeln führen kann. Um einen Überblick über die Störpegel zu erhalten und mögliche negative Trendentwicklungen zu identifizieren, die in Zukunft zu EEQ-Problemen führen könnten, wird die Langzeitüberwachung von EEQ-Kenngrößen immer wichtiger. Viele Netzbetreiber auf der ganzen Welt führen entsprechende Messkampagnen zur Überwachung der EEQ durch, wobei die Anzahl der installierten Messgeräte von einigen hundert bis zu mehreren zehntausend reicht. Die EEQ-Messkampagnen erzeugen große Datenmengen, die effiziente und automatisierbare Methoden zur Datenanalyse erfordern.

Um potentielle Risiken frühzeitig zu erkennen und entsprechende Gegenmaßnahmen zu ergreifen, ist es u.a. wichtig aktuelle Trendentwicklungen einzelner EEQ-Kenngrößen möglichst genau prognostizieren zu können. Die dafür eingesetzten Prognoseverfahren sollten für eine Anwendung in Messkampagnen mit großen Datenmengen nicht besonders rechenintensiv und aufgrund der Vielzahl an Messpunkten und EEQ-Kenngrößen sehr flexibel einsetzbar sein.

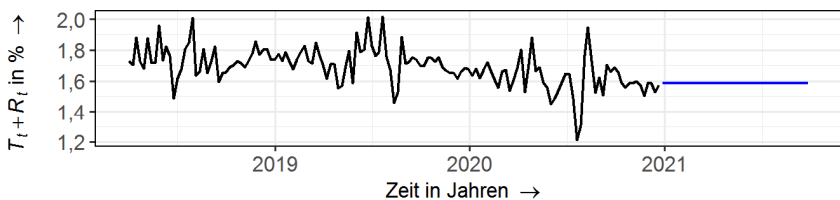
Neben sehr bekannten Modellansätzen (z.B. ARIMA-Modelle) sind Verfahren basierend auf Zeitreihenzerlegung besonders für die Anwendung auf Kenngrößen der Strom- und Spannungsqualität geeignet. Die charakteristischen zeitlichen Abhängigkeiten von Qualitätskenngrößen werden typischerweise durch eine Trendkomponente T_t , Saisonkomponente S_t und eine Restkomponente R_t berücksichtigt. Diese lassen sich durch additive Zeitreihenmodelle abbilden:

$$y_t = T_t + S_t + R_t \quad \text{mit} \quad t = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

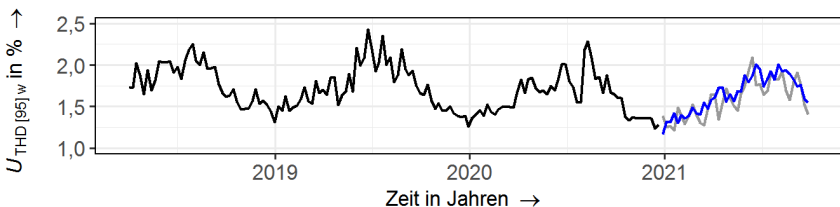
Mit Hilfe des STL-Verfahrens werden die Zeitreihen in die entsprechenden Komponenten zerlegt. Die Komponenten lassen sich mit unterschiedlichen Verfahren einzeln prognostizieren und wieder zu einer Gesamtprognose zusammensetzen. Dies wird am Beispiel der Zeitreihe der Spannungsverzerrung in Bild 1 veranschaulicht. Für die Prognose der Saisonkomponente der Zeitreihe wird in Bild 1 a der saisonal naive Ansatz angewendet. Für die Prognose der saisonbereinigten Zeitreihe (Trend- und Restkomponente) in Bild 1 b wird eine einfache exponentielle Glättung angewendet. Anschließend werden die Einzelprognosen zur Gesamtprognose (Bild 1 c) kombiniert. Der mittlere Prognosefehler von 7 % zeigt, dass genaue Prognosen mit Hilfe von Zeitreihenzerlegung und einfachen Prognoseverfahren möglich sind. Aufgrund der Vielzahl möglicher Prognoseverfahren, welche für die Vorhersage der Einzelkomponenten anwendbar sind, ist diese Variante besonders vielseitig einsetzbar. Erste Untersuchungen haben ergeben, dass die Prognose mittels Zeitreihenzerlegung im Mittel genauere Prognosen als konventionelle Verfahren (z.B. das Holt-Winters-Verfahren) ermöglicht.



(a) Prognose der Saisonkomponente S_t mit saisonal naivem Ansatz



(b) Prognose der saisonbereinigten Komponente $T_t + R_t$ mit exponentieller Glättung



(c) Kombination der Einzelprognosen aus (a) und (b)

Bild 1: Prognose der Spannungsverzerrung U_{THD} mittels Zeitreihenzerlegung; Prognose der Einzelkomponenten (blau) in (a) und (b); Kombination der Einzelprognosen zur Gesamtprognose (blau) in (c); Trainingsdaten (schwarz) und Testdaten (grau); Prognosehorizont: 40 Wochen



Etienne Gasch, Dipl.-Ing.

Untersuchungen zur Flickerausbreitung im Übertragungsnetz

Stahlwerke zählen durch ihre Lichtbogenöfen zu den größten Flickererzeugern. Der Lichtbogen, welcher zum Einschmelzen des Schrottes dient, ist hoch dynamisch und hat eine nichtlineare und schnell veränderliche Strom-Spannungs-Kennlinie. Der Lichtbogen hat einen sehr hohen Leistungsbedarf und wird in der Regel durch einen eigenen Ofentransformator gespeist. Der schnell und stark veränderliche Widerstand des Lichtbogens führt dazu, dass auch die Stromaufnahme schnell und stark veränderlich ist, was zu hohen Spannungsschwankungen und damit hohen Flickerpegeln führt. Um den Flickerpegel auf eine angemessene Höhe zu begrenzen, so dass keine unerwünschten Rückwirkungen auf andere Kundenanlagen entstehen, werden u.a. Kompensationsanlagen eingesetzt. Dennoch wird in den meisten Fällen ein nicht unerheblicher Flickerpegel am Anschlusspunkt des Stahlwerkes in das Übertragungsnetz emittiert. Ziel des vorgestellten Projektes ist die Untersuchung der Ausbreitung des Flickerpegels in Übertragungsnetzen und deren Quantifizierung mittels Transferkoeffizienten.

Im vorliegenden Fall stellt das Umspannwerk UW A (Bild 1), welches etwa 15 km vom Stahlwerk entfernt liegt, den Anschlusspunkt für das Stahlwerk dar. Dieses wird über eine 110 kV-Leitung versorgt, welche über einen eigenen 220 kV/110 kV Transformator an das UW A angeschlossen ist. Die Oberspannungsseite des UW A beträgt 220 kV.

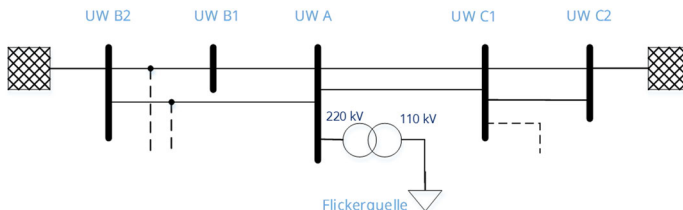


Bild 1: Schematischer Netzplan des 220 kV Netzes mit Stahlwerk als Flickerquelle

Der Verlauf der Kurzzeit-Flickerstärke für alle drei verketteten Spannungen im UW A ist in Bild 2 gezeigt. Es ist ein deutlicher Wochenzyklus zu erkennen. An einem Tag in der Woche ist die Kurzzeit-Flickerstärke für einige Stunden deutlich niedriger. Das könnte auf einen Wartungszeitraum hindeuten, in dem der Lichtbogenofen länger ausgeschaltet ist.

Bild 3 zeigt die Kurzzeit-Flickerstärken im UW A (dunkelblau) und den benachbarten Umspannwerken für die verkettete Spannung U_{L12} . Die Kurzzeit-Flickerstärken der benachbarten Umspannwerke ist erwartungsgemäß niedriger. Es ist eine deutliche Korrelation zu erkennen, was insbesondere durch die an allen Umspannwerken gleichzeitige Reduzierung der Kurzzeit-Flickerstärke in den mutmaßlichen Wartungszeiträumen des Lichtbogenofens

erkennbar ist. Die Höhe der Kurzzeit-Flickerstärke nimmt mit steigender Entfernung vom UW A erwartungsgemäß ab.

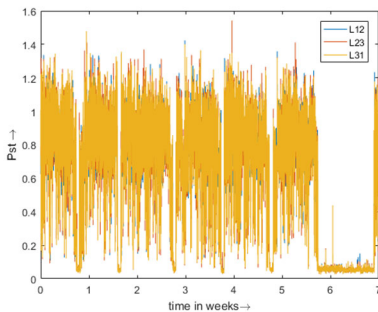


Bild 2: Kurzzeit-Flickerstärke für UW A in der Nähe des Lichtbogenofens

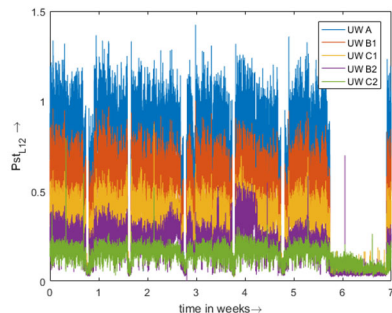


Bild 3: Kurzzeit-Flickerstärke im UW A und den benachbarten UWs für Leiter 12

In Bild 4 ist der Scatterplot zwischen der Kurzzeit-Flickerstärke im UW A und allen benachbarten Umspannwerken dargestellt. Jeder Punkt stellt einen Zeitpunkt dar, wobei die Kurzzeit-Flickerstärke des UW A auf der x-Achse und die Kurzzeit-Flickerstärken der benachbarten Umspannwerke auf der y-Achse abgetragen sind. Es ist, wie schon in den Zeitverläufen, eine lineare Abhängigkeit bzw. eine hohe Korrelation zu erkennen. Eine Ausnahme bildet dabei UW B2, welches Abhängigkeiten mit zwei deutlich verschiedenen Steigungen zeigt, was auf zwei unterschiedliche Schaltzustände in dem Umspannwerk zurückzuführen ist.

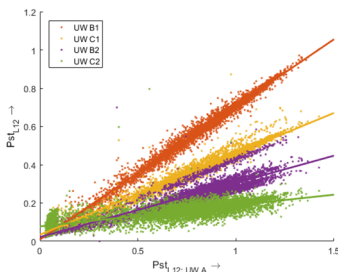


Bild 4: Scatterplot zwischen der Kurzzeit-Flickerstärke im UW A und allen benachbarten Umspannwerken mit Regressionsgeraden

Tabelle 1: Transferkoeffizienten (T_w)

Umspannwerk	T_w
B1	0,70
C1	0,42
B2	0,28 – 0,40
C2	0,11

Die Transferkoeffizienten, welche dem Anstieg der Regressionsgeraden entsprechen sind in Tabelle 1 dargestellt. Ein allseitiger, effektiver Abbau des Flickerpegels im HöS-Netz (durch Vermaschung) ist gegeben, so dass die Beeinflussung unterlagerter Spanungsebenen auf ein angemessenes Maß begrenzt wird. Eine vereinfachte Abschätzung der Flickerreduktion im Aufwärtstransfer mittels Kurzschlussleistungsverhältnis ist in vermaschten Netzen nicht anwendbar.

**Shrinath Kannan, M. Sc.****Assessment of technical feasibility of non-invasive measurement of grid-side harmonic impedance in low-voltage networks**

Harmonic impedance is a topic of increasing importance in power networks, as the penetration of modern electronic equipment grows continuously. Usually, harmonic impedances are categorized into grid-side and customer-side as perceived from a point of connection (PoC). In harmonic studies such as customer contribution assessment as well as for the calculation of emission limits, grid-side harmonic impedance (GHI) plays an important role [1]. Amongst that GHI and grid-side fundamental impedance (GFI) are quintessential to quantify, if a customer installation complies with the allocated limits [2]. The measurement of GHI is possible by both invasive and non-invasive approaches. The former injects a disturbance signal, and the latter observes natural network disturbances. While invasive techniques are highly accurate, they may disturb the nominal operation of the network, and are bulky and expensive solutions. As non-invasive techniques [3] do not perturb the steady-state operation of a network, they have the potential for measuring the GHI using lighter device at lower costs. Oftentimes, non-invasive techniques are proven to be effective only under selected network conditions. They are not comprehensively validated for different networks and varying harmonic conditions. Therefore, the technical feasibility and applicability of state-of-the-art non-invasive techniques need to be assessed.

A comprehensive literature survey on methods to assess the GHI and GFI was performed. Typically, techniques are sensitive to harmonic variations on the grid side. As the covariance method [4] works independently of harmonic variations on the grid-side it was chosen in this study for further evaluation. However, the covariance method assumes that the grid-side harmonic voltage does not impact the current at the PoC. To assess the GFI, the fluctuation-based method is chosen as it yields good results under appropriate threshold criteria. In this feasibility assessment, data from both simulation and field measurements are considered. To incorporate harmonic variations for different PoCs, a simulation framework is developed extending the work presented in [5]. In total 9 scenarios are considered to assess the performance of both covariance and fluctuation-based method as shown in Table I.

Table II shows the results corresponding to all simulation and field scenarios. It can be seen that the covariance method yields good results at the LV busbar, while it yields very poor results at the beginning of the feeder due to the assumption used for the covariance method. At the LV busbar, the grid-side voltage is composed of only the background voltage from the medium-voltage network. However, at the beginning of the feeder, grid-side voltage is composed of both background voltage from the MV network and harmonic voltage caused due to the voltage drop across the impedance produced by the LV customers. Therefore, the covariance method seems not suitable to assess GHI at PoCs in an LV network.

Using a fluctuation-based method with appropriate threshold conditions GFI can be assessed. However, the threshold results only in very few valid samples what extends the duration required for the assessment.

Table I. Overview of scenarios

	Covariance-based (harmonics)		Fluctuation- based (Fundamental)
	Simulation	Field	Field
Locations			
Busbar	1S	1F	4F
Beginning of feeder	2S	2F	5F
End of feeder	3S	3F	6F

Table II. Feasibility assessment for various simulation and field scenarios

		Fundamental		Harmonic
		Field	Simulation	Field
Fluctuation- based	Busbar	✓	✗	✗
	Beginning	✓	✗	✗
	End	✓	✗	✗
Covariance- based	Busbar	✗	✓	✓
	Beginning	✗	✗	✗
	End	✗	✗	✗

- [1] "Technical rules for the assessment of network disturbances (D-A-CH-CZ), Ed. 3, part B: Requirements and assessment, Section I: Low voltage", December 2021.
- [2] M. Pourarab, J. Meyer, M. Halpin, Z. Iqbal, and S. Djokic, "Interpretation of Harmonic Contribution Indices with respect to Calculated Emission Limits," Proc. Int. Conf. Harmon. Qual. Power, ICHQP, vol. 2020-July, 2020.
- [3] S. Kannan, J. Meyer, J. Rens, and P. Schegner, "A Novel Extended Non-invasive Harmonic Resonance Detection Technique for Public Low Voltage Networks," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 9456, no. c, 2022, doi: 10.1109/TIM.2022.3160548.
- [4] J. Hui, H. Yang, S. Lin, and M. Ye, "Assessing utility harmonic impedance based on the covariance characteristic of random vectors," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 25, no. 3, pp. 1778–1786, 2010, doi: 10.1109/TPWRD.2010.2046340.
- [5] S. Kannan, J. Meyer, and P. Schegner, "A Measurement-based Aggregated Simulation Model of Residential LV networks for Harmonic Resonance Studies," in Accepted in AMPs 2022, 2022, pp. 1–6.



Elias Kaufhold, Dipl.-Ing.

**Messbasierte
Stabilitätsanalyse
kommerzieller, einphasiger
Photovoltaikwechselrichter
unter Verwendung von
Luftspulen**



Die zunehmende Durchdringung öffentlicher Niederspannungsnetze mit Wechselrichtern zur Netzkopplung von Photovoltaikanlagen erfordert die Analyse kommerzieller Geräte hinsichtlich des stabilen Netz- und Wechselrichterbetriebs. Um kommerzielle Geräte zu beurteilen und Netzverträglichkeitsstudien aus Perspektive des Netzbetriebs durchzuführen, sind messbasierte Analysen erforderlich, da die detaillierten Schaltungen und Regelalgorithmen der Geräte in der Regel nicht veröffentlicht werden. Für die impedanzbasierte Stabilitätsanalyse wird dazu die Wechselrichterimpedanz mit Hilfe eines Frequenzsweeps gemessen. Eine einfrequente Spannungskomponente $\underline{U}_{AC}(f)$ mit der Frequenz f wird dabei der Grundschiwingung (50 Hz) überlagert, an die netzseitigen Wechselrichterklammern angelegt und über den betrachteten Frequenzbereich schrittweise, z.B. in 50 Hz Schritten, iteriert. Mit Hilfe der gemessenen Stromantwort kann anschließend die Wechselrichterimpedanz berechnet werden (Bild 1). Für die Stabilitätsanalyse kann formuliert werden, dass die Phasenreserve der Netzimpedanz ϕ_{Netz} und der Wechselrichterimpedanz ϕ_{Inv} bei der Frequenz, bei der die Beträge der Netzimpedanz bzw. Teststandimpedanz und der Wechselrichterimpedanz gleich sind, folgende Bedingung erfüllen muss:

$$180^\circ - \phi_{\text{Netz}}(f) + \phi_{\text{Inv}}(f) > 0^\circ \quad (1)$$

Folglich sind hochinduktive Netze besonders kritisch für den Wechselrichterbetrieb.

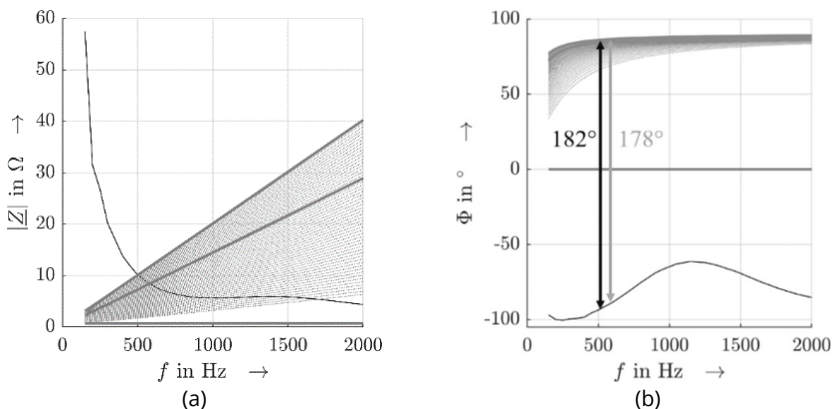


Bild 1: Amplitudencharakteristik (a) und Phasenverlauf (b) der Teststandimpedanz (grau) und der Wechselrichterimpedanz (schwarz).

Für Messungen stellt sich in der Praxis die Herausforderung, dass stellbare Induktivitäten und Stelltransformatoren oft teuer sind und lediglich Induktivitätswerte in einem begrenzten Stellbereich ermöglichen. Durch Reihenschaltung mehrerer Luftspulen und Variation des Luftspaltes zwischen den Luftspulen und somit der magnetischen Kopplung, kann die resultierende Teststandinduktivität $Z_{\text{test}}(f)$ auf einfache Weise und in einem weiten Stellbereich beeinflusst werden. Ein Schema des Messaufbaus ist in Bild 2 abgebildet.

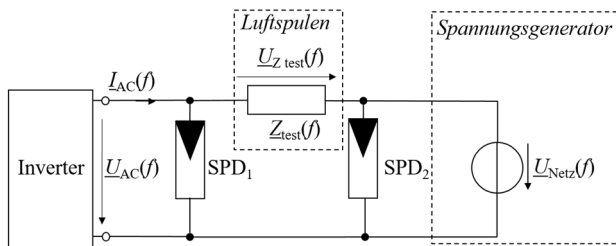


Bild 2: Schema des Messaufbaus.

Um die rechnerisch bestimmte Stabilität eines kommerziellen Wechselrichters im Labor an einem Teststand messtechnisch nachzuweisen, wurden drei Szenarien konzipiert. Szenario I ist angelehnt an eine ideale Netzimpedanz ($Z_{\text{test}} = 0$), Szenario II beinhaltet eine sehr große Teststandinduktivität, die gerade nicht zu einem instabilen Betrieb des Wechselrichters führt. Szenario III entspricht einer Teststandinduktivität, die einen instabilen Wechselrichterbetrieb und folglich eine Abschaltung des Inverters verursacht. Der resultierende Phasenwinkel von 182° (siehe Bild 1 (b)) ergibt eine negative Phasenreserve. Die Teststandinduktivitäten sind in Tabelle 1 gelistet. Es wird eine Resistanz von $0,7 \Omega$ angenommen, die ebenso wie die Induktivität im Frequenzbereich 50 Hz-2000 Hz frequenzunabhängig ist.

Tabelle 1: Übersicht der Szenarios

Spalte 1	Szenario I	Szenario II	Szenario III
Teststandinduktivität	0 mH	2,3 mH	3,2 mH

Bild 3 zeigt die Messergebnisse. Die rechnerische Vorhersage, dass der Wechselrichter in Szenario II stabil betrieben werden kann, jedoch in Szenario III abschaltet, lässt sich anhand des netzseitigen Wechselrichterstroms i_{AC} erkennen.

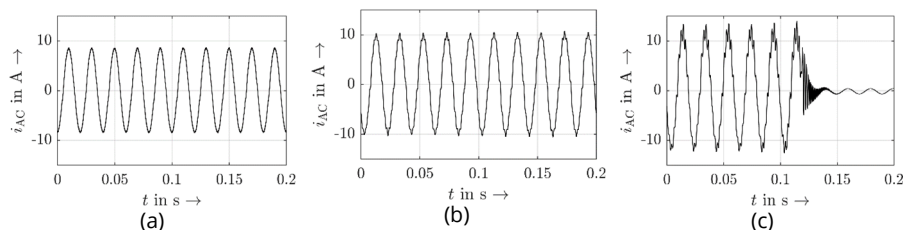


Bild 3: Netzseitiger Wechselrichterstrom für Szenario I (a), Szenario II (b) und Szenario III (c).



Victor Khokhlov, M. Sc.

Störfestigkeit von Geräten des Massemarktes gegenüber Harmonischen

Gefördert durch



Normungsgremien diskutieren derzeit Anhebungen der aktuellen Verträglichkeitspegel für geradzahlige und durch drei teilbare Harmonische in Industrienetzen, welche zukünftig auch für öffentliche Netze übernommen werden könnten. Bild 1 stellt die aktuellen Verträglichkeitspegel nach DIN EN 61000-2-4 Klasse 2 [1] einem Vorschlag für die Anhebung gegenüber.

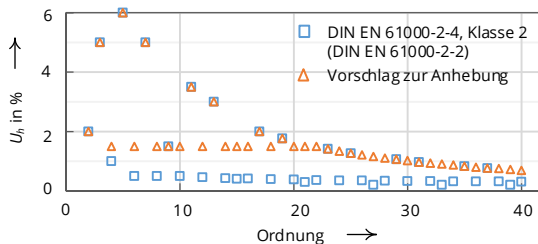


Bild 1: Aktuelle und vorgeschlagene Verträglichkeitspegel

Bisher existieren keine belastbaren Erkenntnisse, wie sich mögliche Anhebungen der Verträglichkeitspegel und daraus resultierende, erhöhte Anforderungen an die Störfestigkeit insbesondere auf Geräte des Massenmarktes im öffentlichen Niederspannungsnetz auswirken. Im Rahmen einer Studie [2] werden die Auswirkungen höherer Störpegel auf ausgewählte einphasige elektrische Geräte mit hoher Durchdringung im öffentlichen Niederspannungsnetz anhand systematischer Messungen bewertet.

Es wurde die Störfestigkeit von zwanzig einphasigen Geräten des Massenmarktes untersucht. Die Auswahl orientiert sich an den in Haushalten typischerweise genutzten Geräten und berücksichtigt verschiedene, aktuell gebräuchliche Schaltungstopologien, Bauformen und Preissegmente. Die ausgewählten Geräte lassen sich in sechs Kategorien einteilen: Beleuchtung (z. B. LED-Lampen), Audio/Video (z. B. Fernsehgerät), Datenverarbeitung (z. B. Ladegeräte und Netzteile), Küche (z. B. Kühlschrank), Bad (z. B. Haartrockner) und Erzeugung (z. B. PV-Wechselrichter).

Die Beeinflussung der ausgewählten Geräte durch einzelne Harmonische wird in Kurz- und Langzeitauswirkungen unterteilt. Erstere umfassen reversible und irreversible Störfunktionen (z. B. akustische Geräuschentwicklung, Flicker, Fehlfunktionen). Sie werden durch die kontinuierliche Beobachtung der Geräte erfasst. Letztere betrachten die thermische Zusatzbeanspruchung, welche zu einer Lebensdauerreduktion der Geräte führen kann und mit der sogenannten nicht netzfrequenten Wirkleistung (P_{ng}) im Zusammenhang steht.

$$P_h = U_h \cdot I_h \cdot \cos(\varphi_{hU} - \varphi_{hI}) \quad (1)$$

$$P_{ng} = \sum_{h=2}^{40} P_h \quad (2)$$

Im Zuge der Störfestigkeitsprüfung werden die Prüfpegel der Harmonischen entsprechend den aktuellen Prüfpegeln nach DIN EN 61000-4-13 [3], Klasse 2 ausgewählt oder auf Basis des Vorschlages zur Anhebung der Verträglichkeitspegel extrapoliert.

Als Ergebnis wurden störende Kurzzeitauswirkungen, nämlich Schallemission, lediglich bei einer Klimaanlage festgestellt. Diese treten bereits bei der Prüfung mit den aktuellen Prüfpegeln auf. Zusätzliche Störwirkungen in Folge der Beaufschlagung mit den extrapolierten Prüfpegeln wurden nicht beobachtet.

Im Gegensatz dazu wurden Langzeitauswirkungen, die durch eine dauerhafte Zusatzerwärmung der Bauelemente entstehen, für alle getesteten Geräte festgestellt. Sie werden anhand der Änderung der nicht netzfrequenten Wirkleistung gegenüber deren Wert bei sinusförmiger Prüfspannung (Referenzverlauf) bewertet. Der größte Anstieg der thermischen Zusatzbeanspruchung zwischen aktuellen und extrapolierten Prüfpegeln wurde bei Geräten mit der Schaltungstopologie ohne Leistungsfaktorkorrektur festgestellt.

Die Analyse der Einzelharmonischen mit aktuellen Prüfpegeln zeigt, dass ungeradzahlige, nicht durch drei teilbare Harmonische niedriger Ordnung (bis 13. Ordnung) gegenüber den Harmonischen höherer Ordnung (ab 14. Ordnung) einen deutlich höheren Einfluss auf die nicht netzfrequente Wirkleistung haben. Die maximale Erhöhung beträgt bei Harmonischen niedriger Ordnung 9 % in Bezug auf die Grundsicherungswirkleistung und bei Harmonischen höherer Ordnung 3 %. Mit den extrapolierten Prüfpegeln wurde eine zusätzliche Erhöhung bei geradzahligen und durch drei teilbaren Harmonischen um 2 % festgestellt. Somit ist ein vergleichbarer Einfluss von geradzahligen und ungeradzahligen Harmonischen bei höheren Ordnungen zu erwarten.

Die Ergebnisse zeigen, dass die vorgeschlagene Anhebung der Verträglichkeitspegel keine zusätzlichen Störwirkungen und Fehlfunktionen bei zwanzig untersuchten Geräten des Massenmarktes verursacht. Dennoch kann eine Erhöhung der Verträglichkeitspegel eine erhöhte thermische Zusatzbeanspruchung bedingen, welche zu einer Lebensdauerreduktion der Geräte führen kann. Das betrifft insbesondere preiswerte Geräte mit der Schaltungstopologie ohne Leistungsfaktorkorrektur, vor allem LED-Lampen, Ladegeräte und Netzteile in einer kompakten Bauform ohne aktive Belüftung.

- [1] DIN EN 61000-2-4: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 2-4: Umgebungsbedingungen - Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen in Industrieanlagen, 2003.
- [2] V. Khokhlov, F. Möller, J. Meyer, and P. Schegner, "Immunity of mass-market electrical appliances to harmonic distortion of the supply voltage," 2022 20th International Conference on Harmonics & Quality of Power (ICHQP), 2022.
- [3] DIN EN 61000-4-13: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 4-13: Prüf- und Messverfahren - Prüfungen der Störfestigkeit am Wechselstrom-Netzanschluss gegen Oberschwingungen und Zwischenharmonische einschließlich leitungsgeführter Störgrößen aus der Signalübertragung auf elektrischen Niederspannungsnetzen, 2016.



Sascha Müller, Dipl.-Ing.

Feldtest zur Oberschwingungsemission einer Schnellladeinfrastruktur mit Batteriespeicher

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Mit fortschreitender Elektrifizierung des Straßenverkehrs gewinnen Schnellladesäulen, die durch eine hohe Ladeleistung eine Aufladung der Fahrzeugbatterie in kurzer Zeit ermöglichen, zunehmend an Bedeutung. Aufgrund der hohen Ladeleistung ist es notwendig zu prüfen, ob die installierte Leistung der Schnellladeinfrastruktur vom Netz bereitgestellt werden kann. Um in Fällen, in denen dies z.B. aufgrund einer bereits hohen existierenden Ausnutzung des Netzes nicht möglich ist, trotzdem einen Anschluss ohne einen aufwendigen Ausbau des Netzes zu ermöglichen, kann zusätzlich ein Batteriespeicher installiert werden, welcher die maximale Bezugsleistung der Ladeinfrastruktur begrenzt (Spitzenlastkappung). Zu beachten ist dabei allerdings, dass dieser ebenfalls eine leistungselektronische Komponente darstellt, welche die Elektroenergiequalität, insbesondere die Verzerrung des Netzstromes durch Oberschwingungen, beeinflusst. In einem Feldtest, in welchem für eine aus drei Schnellladesäulen und einem Batteriespeicher bestehende Anlage ein möglichst hoher Ausnutzungsgrad in Bezug auf die installierte Leistung realisiert werden sollte, wurden daher die Auswirkungen auf die Oberschwingungsemission näher untersucht [1]. Die schematische Struktur des Netzes ist Bild 1 zu entnehmen.

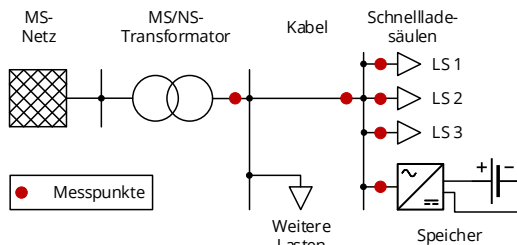


Bild 1: Schematische Struktur des Netzes

Für den Test, bei dem nacheinander drei Elektrofahrzeuge an jede der Schnellladesäulen angeschlossen wurden, galt für den Batteriespeicher zunächst ein Sollwert von annähernd Null für die maximale Netzbezugsleistung. Dieser wurde nach etwa 22 Minuten auf den im Normalbetrieb geltenden Wert von 140 kW zurückgesetzt.

Bild 2 zeigt die während des Feldtests aufgenommenen Verläufe von Wirkleistung, gesamten Oberschwingungsstrom (THC) und Oberschwingungsverzerrung der Spannung (THD_U). In Bild 2a und Bild 2b wird aufgrund einer hohen Symmetrie zwischen den Leitern auf die Größen in L1 und L2 verzichtet. Hervorgehoben (rote Linie) ist jeweils der Zeitpunkt der maximalen Ausnutzung (maximaler Wirkleistungsbezug) der drei Schnellladesäulen. Zu erkennen ist, dass der Speicher zu Beginn den Wirkleistungsbedarf der Schnelllader übernimmt.

Erst bei der maximalen Ausnutzung (ca. 250 kW dreiphasig) wird ein Teil der benötigten Wirkleistung aus dem Netz bezogen. Während die Spitzenlastkappung damit wie vorgesehen funktioniert, ist im Hinblick auf die Oberschwingungsströme festzustellen, dass der Speicher hier keine reduzierende Wirkung hat. Stattdessen addieren sich die Oberschwingungsströme der Schnelllader im Kabel praktisch arithmetisch auf. Das Maximum sowohl des THC als auch des THD_U wird genau bei der maximalen Ausnutzung der Ladesäulen erreicht, was auf eine Leistungsabhängigkeit der Oberschwingungsemission hindeutet.

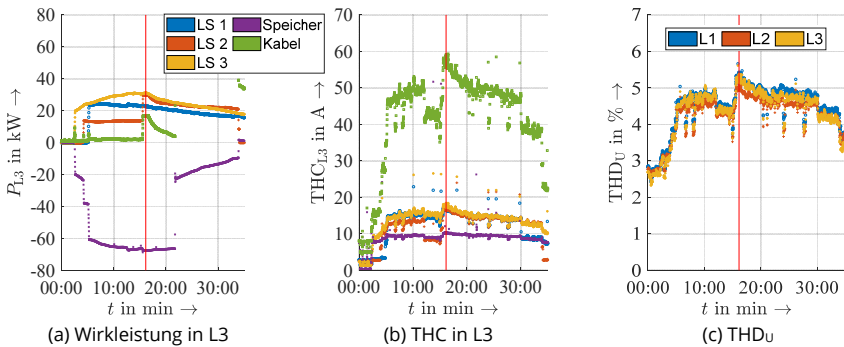


Bild 2: Verläufe von Wirkleistung THC und THD_U (rote Linie: Zeitpunkt maximaler Ausnutzung)

Bild 3 zeigt abschließend die komplexen Zeiger der 5. und 7. Stromharmonischen im Kabel bei unterschiedlichen Ausnutzungsgraden. Diese Darstellung bestätigt, dass die beiden betragsmäßig größten Stromharmonischen mit zunehmender Ausnutzung der Schnellladeinfrastruktur ansteigen. Sowohl in Bezug auf die Modellierung als auch in Bezug auf die Emissionsbewertung der Anlage ist dieses Verhalten zu berücksichtigen.

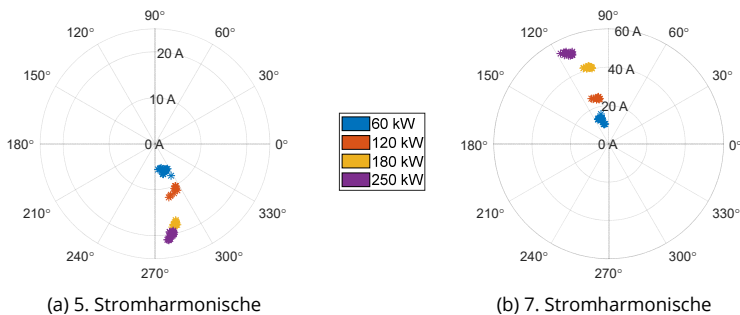


Bild 3: Oberschwingungsströme im Kabel bei unterschiedlichen Ausnutzungsgraden

- [1] S. Müller, J. Meyer, J. Jacob and 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, June 2022.



Morteza Pourarab, M. Sc.

Harmonic Emission Assessment of Customer Installations Considering Actual Level of Cancellation

Gefördert durch



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE

Calculation of harmonic emission limits is established based on a number of assumptions. Once the customer installations are in operation, the actual conditions might deviate from this assumptions and should be considered to ensure an efficient utilisation of the harmonic hosting capacity of the power system. One of these assumptions is the (phase angle) diversity between harmonic emission of customer installations and the existing background distortion due to their random behaviour. This diversity (level of cancellation) is represented as summation exponent $\alpha^{(h)}$ at harmonic order h and implemented by using a set of harmonic-dependent target values. However, the actual level of cancellation between the emission level of a disturbing installation and the background distortion could be higher, lower or the same as the target value. The proposed methodology is intended to determine the harmonic emission of a customer installation considering the actual level of cancellation. In the method recommended by IEC, e.g. [1], the harmonic “emission level” of a disturbing installation is defined as the magnitude of the emission phasor caused by the customer installation considering a target cancellation. The emission level of a customer installation is referred to as “magnitude index” and is required to be less than the emission limit. The emission level of a customer installation taking the actual level of cancellation into account, which is determined by measurements, is referred to as “difference index”. The actual level of cancellation depends not only on the phase angle between emission phasor of customer installation and background distortion, but also on the existing level of background distortion itself, which is usually time-variable. If background distortion is zero, no actual cancellation can be determined and the difference index equals the magnitude index. Consequently, the limit for the difference index is not fixed and must be calculated using the existing background distortion and the target cancellation individual for each time instant as follows:

$$U_{\text{diff lim}}^{(h)} = \sqrt{\left(\underline{U}_s^{(h)}\right)^{\alpha^{(h)}} + \left(U_{\text{lim}}^{(h)}\right)^{\alpha^{(h)}}} - \left|\underline{U}_s^{(h)}\right| \quad (1)$$

where $U_{\text{diff lim}}^{(h)}$ is the permissible difference index, $U_{\text{lim}}^{(h)}$ is the permissible magnitude index (emission limit), $\underline{U}_s^{(h)}$ is the background distortion and $\alpha^{(h)}$ is the summation exponent at harmonic order h as specified in [1] and represents the target level of cancellation. It should be noted that the limit of difference index $U_{\text{diff lim}}^{(h)}$ is newly introduced while the limit of the magnitude index $U_{\text{lim}}^{(h)}$ is established in standards.

The method is applied to a number of field measurements in the framework of the Swiss-German research project iREF-Grid. Figure 1 shows an example of the 5th harmonic emission of a low voltage (LV) customer installation for a duration of 12 hours.

The blue line represents the magnitude index, which reflects the “emission level” of the customer installation based on the target cancellation $\alpha^{(5)} = 1.4$. The black dash-dotted line is

the calculated emission limit. The red line represents the difference index and the yellow dash-dotted line the respective limit for the difference index.

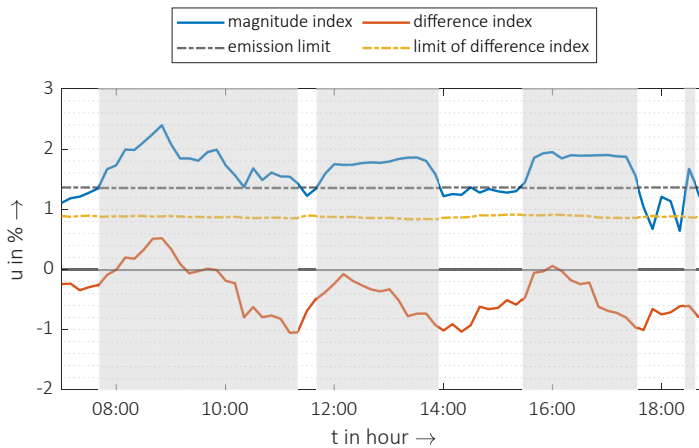
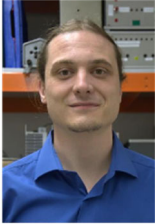


Figure 1: Example of 5th harmonic voltage emission of customer installation

As can be seen, in some instances (shaded areas in the figure), the magnitude index indicates violation of emission limit. The difference index can meanwhile be positive or negative. A negative difference index indicates that the harmonic emission phasor of customer installation results in decreased level of harmonic distortion at the point of connection. In general, in the considered period, the difference index indicates a cancellation (diversity) at 5th harmonic better than the target value and meets the respective limit during the whole period.

Continuous assessment of the proposed index would enable the network operators to optimise their network hosting capacity. Further details will be published in [2].

- [1] IEC TR 61000-3-14:2011 (Ed. 1): Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-14: Assessment of emission limits for harmonics, interharmonics, voltage fluctuations and unbalance for the connection of disturbing installations to LV power systems.
- [2] M. Pourarab, J. Meyer, O. Domianus, T. Naef, M. Ulrich and R. Rölli, "Assessment of Harmonic Emission Level of Customer Installations Considering Actual Level of Cancellation," to be published in Proc. 27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED), 2023.



Robert Stiegler, Dipl.-Ing.

**Nichtlinearität der frequenzabhängigen
Netzimpedanz in öffentlichen
Niederspannungsnetzen**

Die große Zahl leistungselektronischer Geräte führt im Niederspannungsnetz zu Oberschwingungsströmen, welche aufgrund der frequenzabhängigen Netzimpedanz (fNI) zu Oberschwingungsspannungen führen, welche wiederum Geräte unzulässig in ihrer Funktion beeinflussen können. Um Grenzwerte für Oberschwingungsströme, insbesondere für große Anlagen zuverlässig festlegen zu können, aber auch um die Ursachen für hohe Oberschwingungspegel zu analysieren und zuverlässige Simulationen durchzuführen, ist eine genaue Kenntnis der fNI unerlässlich.

Die frequenzabhängige Netzimpedanz ist nur für passive Elemente (z.B. Leitungen und Transformatoren) definiert. Im Falle elektronischer Geräte mit geschalteten Elementen kann sich die fNI innerhalb einer Spannungshalbwelle jedoch deutlich ändern. Dies gilt insbesondere für einfache Gleichrichterschaltungen deren Zwischenkreiskondensator während der kurzen Nachladezeit von wenigen Millisekunden je Halbwelle der Netzspannung mit dem Netz verbunden ist. In der restlichen Zeit verhält sich die Schaltung eingangsseitig hochohmig. Um den Einfluss dieser nichtlinearen Verbraucher auf die frequenzabhängige Netzimpedanz zu bestimmen wurden zwei Messkampagnen ausgewertet. In der ersten Messkampagne wurden repräsentative Messungen in Niederspannungsnetzen von 12 Verteilnetzbetreibern (VNB) durchgeführt. Dabei wurden je VNB städtische und ländliche Netze berücksichtigt und in jedem Netz an der Transformatorsammelschiene sowie mindestens in einem Kabelverteiler am längsten Netzausläufer gemessen [1]. Insgesamt wurden 200 fNI an 76 Messorten gemessen. In der zweiten Messkampagne wurde die fNI an Steckdosen in 11 Haushalten gemessen. Dabei konnten insgesamt 133 Messungen durchgeführt werden.

Das für die Messkampagnen verwendete Messgerät (IMD300) wurde am Institut in Kooperation mit einem Industriepartner entwickelt. Es unterstützt neben der Messung der mittleren fNI (mfNI) über ganze Perioden der Spannungsgrundschiwingung auch die Messung der Impedanz innerhalb der Spannungsgrundschiwingung (sogenannte subperiodische frequenzabhängige Netzimpedanz, spfNI).

Bild 1 zeigt beispielhaft die spfNI an einem Kabelverteiler. Die spfNI ist dabei über dem Winkel der Spannungsgrundschiwingung aufgetragen. Zwischen ca. 800 Hz und 1,8 kHz ist dabei die hohe Impedanz der ersten Resonanzstelle sichtbar. Im Spannungsmaximum und -minimum (90° und 270°) verringert sich die spfNI deutlich auf ca. ein Zehntel des Wertes in der Nähe des Nulldurchgangs (Bild 2). Dies zeigt den Einfluss von am Netz angeschlossenen Verbrauchern mit einfachen Gleichrichterschaltungen, welche in diesem Zeitbereich ihren Nachladevorgang haben.

Um diese Variabilität der spfNI vergleichen zu können, werden die Nichtlinearitätsfaktoren nach (1) und (2) eingeführt. Dabei wird für jede Frequenz das 5 % und das 95 % Quantil auf

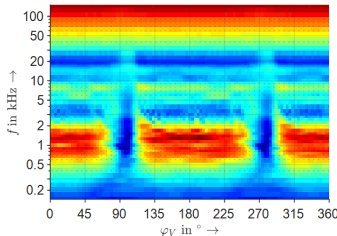


Bild 1: Beispiel der Sub-Cycle-Impedanz an einem Kabelverteiler

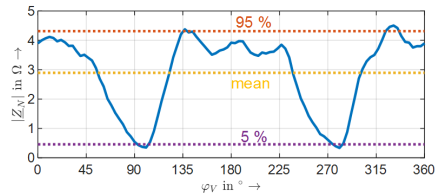


Bild 2: Beispiel der Sub-Cycle-Impedanz an einem Kabelverteiler bei 1,1 kHz

den Mittelwert der spfNI bezogen. Da der Mittelwert der spfNI der fNI gemessen über ganze Perioden der Spannungsgrundschwung entspricht, geben diese Faktoren an, wie stark die spfNI von der mfNI abweicht. In dem Beispiel aus Bild 2 ist die spfNI mit $r_{95} = 1,48$ bis zu 1,48 Mal größer und mit $r_{95} = 0,16$ bis zu 6 Mal kleiner als die mfNI.

$$r_{95}(f) = \frac{Z_{N[95]}(f)}{Z_N(f)} \quad (1)$$

$$r_5(f) = \frac{Z_{N[5]}(f)}{Z_N(f)} \quad (2)$$

Bild 3 zeigt die Nichtlinearitätsfaktoren aller Messungen sortiert nach Art des Messortes. Dabei sind die Einzelmessungen grau dargestellt und verschiedene Quantile zur besseren Übersicht eingetragen. An allen Arten von Messorten ist eine vergleichsweise hohe Nichtlinearität im Bereich zwischen 500 Hz und 2 kHz vorhanden, hier befindet sich die dominante erste Resonanzstelle welche sich durch die gleichzeitig zugeschalteten Zwischenkreiskapazitäten verschiebt. Bei höheren Frequenzen ist der Einfluss des Messortes deutlich sichtbar: je kürzer die elektrische Entfernung zu den nichtlinearen Geräten, welche sich in den Haushalten befinden, umso größer wird auch die Variabilität der spfNI da bei steigender Frequenz die Leitungsinduktivität zwischen Messort und Geräten dominiert.

Die Messungen zeigen, dass der Einfluss von Geräten mit einfachen Gleichrichterschaltungen auf die fNI im Niederspannungsnetz deutlich vorhanden ist und in zukünftigen Untersuchungen berücksichtigt werden muss.

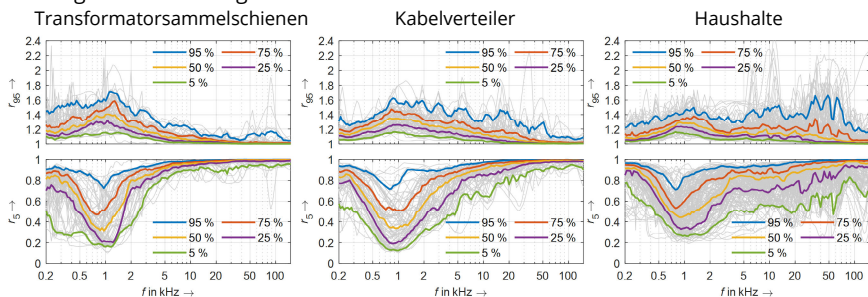


Bild 3: Nichtlinearitätsfaktoren der Messorte

- [1] R. Stiegler, J. Meyer, S. Schori, M. Höckel, K. Scheida, J. Drápela, T. Hanžlík, "Survey Of Network Impedance In The Frequency Range 2-9 KHz In Public Low Voltage Networks In AT/CH/CZ/GE", 25th International Conference on Electricity Distribution CIRED, Madrid, 2019.



Olga Zyabkina, M. Eng.

**Identification of Disturbance Patterns
in Long-term Measurements of Power
Quality Characteristics**

The network operators conduct extensive measurement campaigns to monitor the PQ conditions that result in large amount of data. Using this data and machine learning methods (ML) the typical disturbance pattern can be extracted. This can be used to monitor the PQ conditions between costumer types and PQ parameters, and to detect the change in emission behavior. All this information enables a more pointed PQ management for the network operator, e.g. to react as early as possible to changes in disturbance patterns.

In order to detect the typical disturbance patterns in PQ parameters, a methodology based on unsupervised k-means clustering has been developed [1]. The methodology consists of three steps: *aggregated daily pattern extraction*, *similarity evaluation* and *clustering*. The proposed methodology has been tested on 29 PQ parameters (i.e. harmonics, RMS values, unbalance, etc.) aggregated on 9-min base. The data were collected in a transmission system at 12 measurement points (MP) of three customer types: municipal electricity, photovoltaic stations and electrified railways.

In Step 1, the daily patterns are divided into three day groups: working days (Wo), Saturdays (Sa), as well as Sunday and public holidays (SuHo). Next, the aggregated daily pattern is determined by calculating the 50th percentile (me-dian) for each day group on yearly base. This way, a time series of 365 days is reduced to a time series with 160 50th percentile values. In Figure 1 the daily time series partitioned into three groups are presented, where the aggregated daily patterns are highlighted in red color.

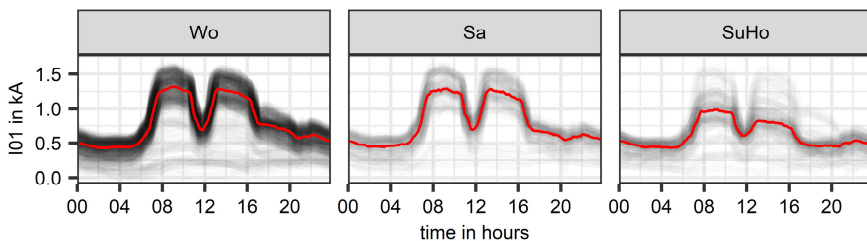


Figure 1: Daily profiles of I01 in phase L1 (grey) grouped in Wo, Sa and SuHo day groups with aggregated daily pattern (red)

In Step 2, the similarity between the aggregated daily patterns over all PQ parameters, phases and measurement points is evaluated using the Euclidean distance measure. A suitable number of clusters is determined using three validation indices: Calinski-Harabasz index (CH), Dunn's index (D) and SD index (SD). K-means clustering is applied with varying

number of clusters from 2 to 15. For each number of clusters three indices are calculated. According to the indices the optimal number of cluster $k=3$ is selected.

In Step 3, the unsupervised k-means clustering is applied to partition PQ data into $k=3$ clusters, where the number of clusters is equal to number of centroids. This algorithm minimizes an objective function (i.e. Euclidian distance between a data point and the centroid) to fix the centroid points and consequently assign all of data samples to a cluster.

In Figure 2, the resultant partitioning of aggregated daily patterns is presented in different colors, whereas the average disturbance pattern for each cluster is highlighted with a black line. As it can be seen, over all PQ parameters, phases and MPs only three typical disturbance patterns have been identified. The pattern are distinctively different from each other, where in the cluster 1 a “W”-shape, in the cluster 2 a “M”-shape and in the cluster 3 a “flat”-shape pattern are located. The aggregated daily patterns in the clusters 1 and 2 are opposite to each other and vary within similar ranges. However, patterns in the cluster 3 exhibit a more narrow range of variation and slightly increase in interval from 16:00 o’clock up to midnight.

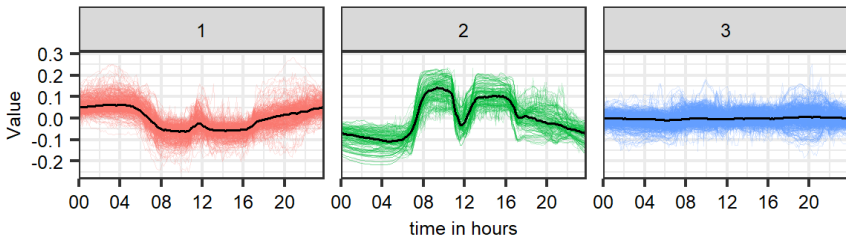


Figure 2: Partitioning of aggregated daily patterns in cluster 1 (left), cluster 2 (central) and cluster 3 (right) over all PQPs, phases and measurement points; average disturbance pattern (black line)

The aggregated daily profiles of the current and voltage quality parameters are allocated among all three clusters. However, the low order voltage harmonics are mostly assigned into the cluster 1, whereas the current harmonics to the cluster 2. The higher order current and voltage harmonics tend to be allocated to the cluster 3.

The electrified railways and municipal electricity MPs exhibit high similarity in the current quality parameters assigned to the clusters 1 and 2. In terms of voltage quality parameters, electrified railways and renewable generation are more similar and assigned to the clusters 1 and 3.

- [1] O. Zybalkina, M. Domagk, J. Meyer, et al. “Identification of Disturbance Patterns in Long-term Measurements of Power Quality Characteristics in Chinese Large Cities” in CIREN Shanghai Workshop 2022: Smart power distribution for sustainable and fast evolving cities, 2022, September (in press).

Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Schutz- und Leittechnik“



Michael Bruhns, Dipl.-Ing.

**Kenngößen und Einflussgrößen
stromstarker Störlichtbögen für die
Schutzauslegung in
Niederspannungsanlagen**



Stromstarke Störlichtbögen weisen ein extremes Gefährdungspotential auf. Daher wird zur Verminderung und Reduktion von Personen- und Anlagenschäden ein Schutzsystem benötigt, das stromstarke Störlichtbögen ultraschnell detektiert. Die Auslegung eines entsprechenden Schutzsystems setzt die Kenntnis relevanter Kenngrößen voraus. [1]

Kenngößen zur Beschreibung von Störlichtbögen in Niederspannungsanlagen

Die zentrale Aufgabe des Anlagenfunktions- und des Personenschutzes gegen Störlichtbögen ist die Begrenzung der Lichtbogenenergie E_{LB} , die an der Fehlerstelle freigesetzt wird. Die dazu notwendigen Detektionsalgorithmen basieren auf der Erkennung der charakteristischen Merkmale der Kenngrößen Lichtbogenleistung P_{LB} und Lichtbogenstrom I_{LB} . Bei stabil brennenden Lichtbögen kann die Lichtbogenleistung P_{LB} näherungsweise als konstant angenommen werden, da deren Änderung im quasistationären Zustand kleiner als 5% ist (s. Bild 1). Nach Gl. (1) ist die Lichtbogenenergie E_{LB} zum einen von der Lichtbogenleistung P_{LB} und zum anderen von der Brenndauer t_b abhängig. Da die Brenndauer von der Kommandozeit abhängt, ergibt sich beim Einsatz von Schutzfunktionen mit Überstrom-Zeit-Charakteristik ein Zusammenhang zwischen Brenndauer und Lichtbogenstrom. Für die Schutzauslegung sind daher Lichtbogenstrom und -leistung die relevanten Kenngrößen.

$$E_{LB} = \bar{P}_{LB} \cdot t_b \quad (1)$$

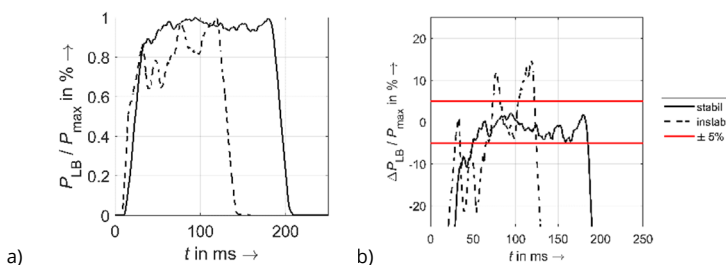


Bild 1: Einfluss des Brennverhaltens auf die Lichtbogenleistung P_{LB} (a) und deren Abweichung von der mittleren Lichtbogenleistung $\Delta P_{LB} = P_{LB} - \bar{P}_{LB}$ (b)

Einflussgrößen auf Störlichtbögen in Niederspannungsanlagen

Die Parameter einer elektrischen Niederspannungsanlage, die Einfluss auf die Kenngrößen von Störlichtbögen haben, werden Einflussgrößen genannt. Sie können in elektrische und nicht-elektrische Einflussgrößen eingeteilt werden (s. Tabelle 1).

Tabelle 1: Typische Einflussgrößen auf Störlichtbögen in Niederspannungsanlagen

Art	Einflussgrößen
Elektrisch	Netzspannung U_N , Kurzschlussstrom I_k , Reaktanz-Resistanz-Verhältnis X/R
Nicht elektrisch	Sammelschienenabstand a_{SS} , Länge der Stützisolatoren a_{RW} , Abstände zu Seitenwänden a_{SW} , Abstand zur Endwand a_{SE} , Material der Seitenwände, Art der Erdung

Ergebnisse der experimentellen Untersuchung relevanter Einflussgrößen

Der Einfluss der Parameter wurde experimentell untersucht. Dazu wurden über 300 Störlichtbogenversuche an einer dreiphasigen Sammelschienenanordnung durchgeführt.

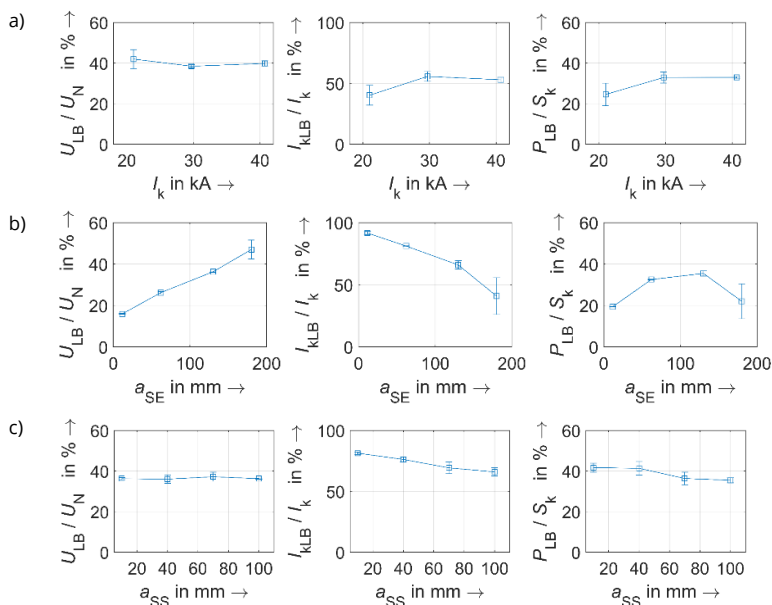


Bild 2: Abhängigkeit der Kenngrößen Lichtbogenstrom I_{kLB} , Lichtbogenleistung P_{LB} von den Einflussgrößen Kurzschlussstrom I_k (a), Abstand zwischen den Sammelschienen a_{SS} (b), Abstand zur Endwand a_{SE} (c) in bezogener Darstellung

Die Verläufe in Bild 2 zeigen, dass die konstruktiven Merkmale der Brennstelle einen wesentlichen Einfluss auf die Kenngrößen haben. Dabei ist vor allem der Abstand zur Endwand relevant, der eine Aufweitung des Lichtbogens verhindert. Hingegen ist der Einfluss des Kurzschlussstroms am Netzanschlusspunkt oder des Sammelschienenabstandes gering.

[1] H. Schau, A. Halinka, W. Winkler: *Elektrische Schutzzeineinrichtungen in Industrienetzen und -anlagen: Grundlagen und Anwendungen*. Heidelberg, 2008.



Ricardo Herrmann, Dipl.-Ing

Schutzkonzepte für Netze mit hohem Anteil leistungselektronischer Einspeiser

Gefördert durch:



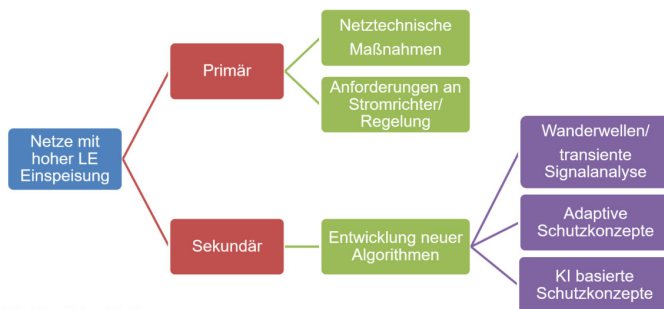
Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Durch die Energiewende werden zunehmend leistungselektronische dezentrale Einspeiser in das Netz integriert. Beispiele hierfür sind PV-Wechselrichter, DC-gekoppelte Windkraftanlagen oder Batteriespeicher. Die sich ändernde Netzstruktur stellt die Selektivschutztechnik vor neue Herausforderungen.

Bekannte Probleme durch dezentrale Einspeisung sind zum einen eine Schutzunterfunktion (blinding of protection). Diese entsteht, da dezentrale Einspeiser zusätzlichen Kurzschlussstrom im Schutzbereich einer Schutzeinrichtung liefert und dadurch ein geringerer Fehlerstrom von dieser gemessen wird. Auch eine Überfunktion (sympathetic tripping) ist möglich. Ein benachbarter Abgang mit einer dezentralen Einspeisung kann in einer ungünstigen Netzkonstellation und Schutzparametrierung unselektiv abschalten. Weiterhin können sich nach einer Schutzabschaltung stabile Netzinseln ausbilden, welche eine ordnungsgemäße Fehlerbeseitigung erschweren.

Durch Zunahme leistungselektronischer Einspeiser kommt weiterhin hinzu, dass sich der Kurzschlussstrombeitrag durch geringere Überstromfähigkeit der Leistungshalbleiter reduziert. Die bisher dominierenden Synchronmaschinen können Kurzschlussströme im Bereich des fünf- bis achtfachen ihres Nennstroms liefern. Aufgrund der wesentlich geringeren thermischen Zeitkonstante leistungselektronischer Bauelemente können diese nur den 1,2 – 1,5-fachen Nennstrom liefern. Ein weiteres Beispiel ist die Kurvenform im Kurzschlussfall, welche durch die eingesetzte Strombegrenzung verzerrt sein und einen hohen Anteil an Oberschwingungen aufweisen kann. Dadurch können Resonanzen im Netz angeregt werden. Weiterhin wird die zweite und fünfte Harmonische zur Transformator-Inrush-Erkennung verwendet. Bei einer zu hohen Emission kann es daher zu einer Unterfunktion des Schutzes kommen.



KI - künstliche Intelligenz

Bild 1: Klassifizierung der Lösungsansätze

Zukünftige Lösungsansätze können nach Bild 1 in primäre und sekundäre Ansätze klassifiziert werden. Zu den primären Ansätzen zählen netztechnische Maßnahmen, wie die Erhöhung der Vermaschung, welche zu mehr Kurzschlussleistung führt. Eine weitere Maßnahme wäre die Definition von Anforderungen an Stromrichter und deren Regelung, wie z. B. die maximale Verzerrung im Kurzschlussfall.

Die sekundärseitigen Lösungsansätze würden eine Anpassung der eingesetzten Schutzverfahren fordern. Da die Entwicklung jedoch langwierig und teuer ist, sind die primären Ansätze zunächst vorzuziehen. Beispiele für sekundäre Ansätze sind KI-basierte Schutzkonzepte oder adaptive Schutzkonzepte, welche ihre Einstellparameter der aktuellen Einspeisesituation anpassen.

Bild 2 zeigt die typischen Schutzverfahren, die in den jeweiligen Netzebenen eingesetzt werden und deren Abhängigkeit von der Kurzschlussleistung. Es zeigt, dass in den höheren Spannungsebenen Schutzverfahren eingesetzt werden, die auch mit einer kleineren Kurzschlussleistung auskommen. Sofern die bisherige Netzstruktur erhalten bleibt, kann der Kurzschlussstrom in den unteren Spannungsebenen aus den übergeordneten Ebenen geliefert werden, sodass eine sinkende Überstromfähigkeit der Einspeiser den Schutz nicht beeinträchtigen sollte.

Dennoch sollte die Sinusform des Kurzschlussstromes gewahrt bleiben, da einige Schutzalgorithmen eine Sinusform zugrunde legen und möglicherweise einen falschen Wert errechnen oder gar unzuverlässig werden.

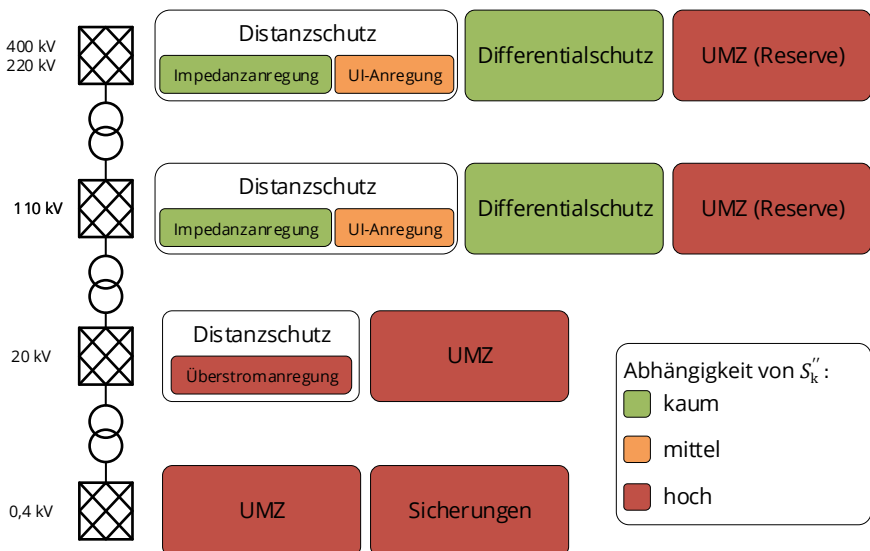


Bild 2: Typische Schutzverfahren nach Netzebene [1]

[1] W. Heckmann, "NETZ:KRAFT Netzwiederaufbau unter Berücksichtigung zukünftiger Kraftwerksstrukturen", pp. 113, Kassel, 2019.



Carlo Liebermann, Dipl.-Ing

Modellierung von sekundären Störlichtbögen



Bei einpoligen Fehlern auf Hochspannungsfreileitungen treten mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit stromstarke Störlichtbögen an der Fehlerstelle (primary arc) auf. Distanzschutzrichtungen haben die Aufgabe, den Fehler zu erkennen. Sie geben dann das einpolige AUS-Kommando zum Ausschalten des Leistungsschalters, sodass der Lichtbogen idealerweise verlöscht. Durch die elektromagnetische Verkopplung werden auch während der AWE-Pause Ladungen auf den isolierten Leiter influenziert sowie eine Längsspannung induziert. Dies führt unter Umständen zu einem Weiterbrennen des Lichtbogens an der Fehlerstelle (secondary arc). Erfolgt die automatische Wiederzuschaltung (AWE) nach Ablauf der AWE-Pausenzeit auf einen solchen Sekundärlichtbogen, war die AWE erfolglos, was eine dreipolige Abschaltung der Leitung erforderlich macht.

Eine sinnvolle Maßnahme gegen das erneute Durchzünden des Lichtbogens ist es, die AWE-Pausenzeit so groß zu wählen, dass der secondary arc sicher verlöscht. Hierfür stehen adaptive Algorithmen zur Verfügung, welche das Brennen des secondary arc erkennen und die Pausenzeit adaptiv anpassen (adaptive AWE). Es besteht dann keine leitende Verbindung mehr zwischen dem fehlerbetroffenen Leiter und dem Mast. Die Zeit bis zum Verlöschen ist dabei unter anderem abhängig vom Lichtbogenstrom, welcher wiederum vom Schaltzustand des Nachbarsystems, der Spannungsebene und der Leitungsauslastung abhängt. Weitere nichtelektrische Einflüsse auf die Brenndauer können beispielsweise die Geometrie der Leitung, die Luftfeuchtigkeit sowie die Windgeschwindigkeit sein. Wenn der secondary arc erloschen ist, kann nach der Entionisierungszeit des Plasmakanals die Wiedereinschaltung erfolgen, ohne dass ein stromstarker Lichtbogen an der Fehlerstelle durchzündet.

Zur besseren Abschätzung der Pausenzeit, und um die Sensitivität der Algorithmen zu verbessern sowie um eine Datengrundlage zur Entwicklung neuer Algorithmen zu begünstigen, werden entsprechende Simulationsmodelle benötigt. Ziel ist es, mit solchen Modellen, das Brennverhalten des Sekundärlichtbogens realistisch abzubilden. Dabei muss ein kombiniertes Leitungs- und Lichtbogenmodell entwickelt werden, mit dem das *transiente* Verhalten eines secondary arc nachgebildet werden kann. Die am Leitungsanfang gemessenen Strom- und Spannungs-Zeitverläufe müssen mit dem Modell berechnet werden können. Dabei soll das Modell unterschiedliche Leitungsanordnungen und Umgebungsbedingungen abbilden können. Ein vielversprechender Ansatz liefert das Leitwertmodell nach Kizilcay [1] und Johns [2], welches mit einem neuen Modell des Lösch- und Wiederzündverhaltens (dielektrisches Wiederzünden) kombiniert wird [3].

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} (G - g) \quad \text{mit} \quad G = \frac{|i|}{(u'_0 + |i| \cdot \tau'_0) \cdot l} \quad \Leftrightarrow \quad g = \frac{1}{s\tau + 1} \cdot G \quad (1)$$

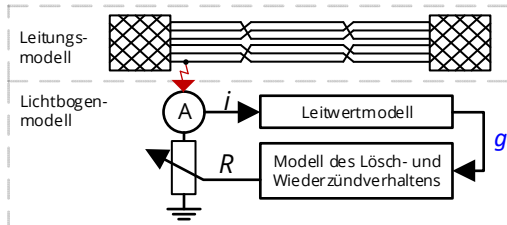


Bild 1: Modellstruktur

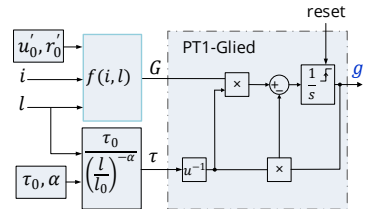


Bild 2: Leitwertmodell [1] [2]

Das Modell, welches das Lösch- und Wiederzündverhalten beschreibt, wird phänomenologisch, anhand von Störschrieben entwickelt. Dabei hat sich gezeigt, dass der Sekundärlichtbogen ab einem bestimmten Leitwert zufällig erlöscht und wieder-zündet (dielektrisches Wiederzünden). Hierfür wird neben dem Zustand „Brennen“ – EIN – und „Erlöschen“ – dh. AUS – ein temporärer Zustand, welcher den instabilen Bereich abbildet – tmp. AUS – eingeführt. In diesem Bereich erlöscht und zündet der Lichtbogen zufällig.

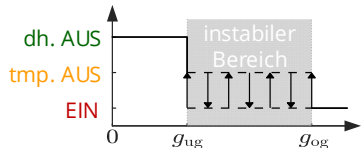


Bild 3: Zustände des Brennverhaltens [3]

Das Modell wird anhand von realen Störschrieben parametrieren. Der Vergleich mit den aufgezeichneten Zeitverläufen zeigt eine gute Übereinstimmung von Modell und Messung.

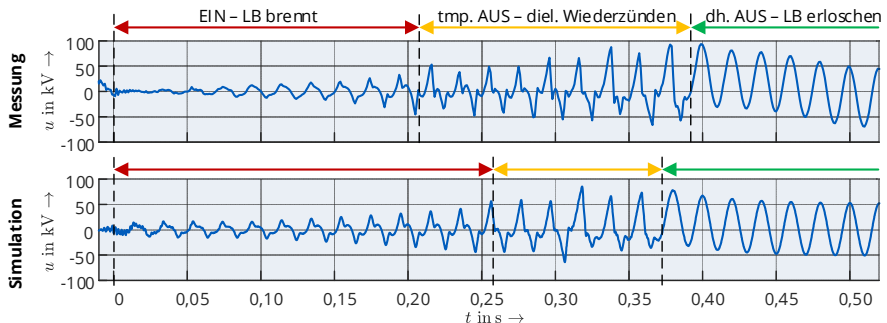


Bild 4: Vergleich von Messung und Simulation

Zur Ableitung allgemeiner Regeln zur Parametrierung sollen zukünftige Untersuchungen an Leitungen anderer Geometrie und Spannungsebene die erlangten Kenntnisse stützen.

- [1] M. Kizilcay u. a. "Interaction of the secondary arc with the transmission system during single-phase autoreclosure", IEEE Bologna PowerTech - Conference Proceedings 2, 2003, S. 7–13. DOI: 10.1109/PTC.2003.1304294
- [2] A. T. Johns, R. K. Aggarwal und Y. H. Song, "Improved techniques for modelling fault arcs on faulted EHV transmission systems". In: IEEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution 141, 1994, S. 148–154. ISSN: 3502360. DOI: 10.1049/IP- GTD: 19949869
- [3] M. Meinck, "Entwicklung eines Modells zur Untersuchung des dynamischen Löschverhaltens von sekundären Lichtbögen im Zeitbereich", Diplomarbeit: TU Dresden, 2021.



Juan Carlos Quispe Huarcaya, M. Sc.

Distance protection for transmission line faults based on the transient behavior of high-frequency signals using a new digital filtering technique.

DAAD
Deutscher Akademischer Austauschdienst
German Academic Exchange Service

CONICET
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

Microprocessor-based relays and new ways of designing their protection algorithms

Microprocessor-based relays have enabled the quick advancement of new signal processing techniques (SPT) and the development of new protection algorithms. Moreover, the trend of protection methods are classified as follows: fault component protection, adaptive, traveling wave, transient, parameter recognition, artificial intelligence, among others. However, these methods go hand-in-hand with SPT. The fast progress of microprocessor technology and signal processing capabilities over time has made it possible to consider new processing techniques that were impractical until a few years ago. Therefore, new techniques that filter the perturbed component of the base signal and then represent it in the time-frequency domain are a matter of study, as described in [1]. In addition, in [2] highlights that the behavior of the frequency spectrum of a fault provides information about its location. This shows the great relevance of the study of transient components; however, these methodologies require an adequate digital signal filter.

In the power systems, events such as short-circuits are unavoidable. In this sense, protection device has the responsibility to detect and identify such an event and then clear the fault as fast as possible. However, fault analysis of electrical networks has always been a challenging subject from different perspectives, since it involves aspects as detection strategies, information management and decision criteria. All these analysis methods require useful signal information, which in many cases are superimposed by components that must be filtered (base signal and noises). For this reason, the protection devices have a digital filtering stage of the signals prior to the protection algorithms and logics (Fig. 1). However, due to the broad spectrum of the high-frequency components, signal processing based on multiresolution techniques is necessary.

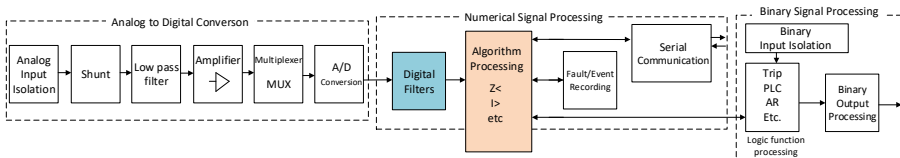


Figure 1: Digital relay operation process

Multiresolution analysis (MRA) of short-circuits in transmission lines

MRA refers to breaking up a signal into components; therefore, it allows extracting signals features over a wide range of frequency spectra. In this sense, the high-frequency signals generated by electrical faults (short-circuits) in transmission lines can be characterized. The most employed technique is developed using the discrete wavelet transform. However, It

has proven to be a good analysis method, it still presents certain weaknesses such as high computational cost that have not yet allowed its implementation in real applications. Therefore, the development of a digital filter based on mathematical morphology (MM) is proposed for its advantages in high frequency signal analysis [3]. On the other hand, based on the distortion effect on the instantaneous signal values caused by traveling waves during a fault, the frequency of the transient signal depends on the fault location, it is very important to know the predominant frequency in the multiresolution analysis is shown in the spectral energy. For this analysis, faults with distances of 25, 50, 75 and 99 km for internal faults, and 101, 115 and 130 km for external faults have been considered. The Fig. 2 shows the characteristics of the cases in time-frequency domain, where the predominant frequency spectrum for each case can be clearly identified. Another highlight is the magnitude of the spectral energy amplitude as it decreases as the fault moves away as shown in Fig. 3.

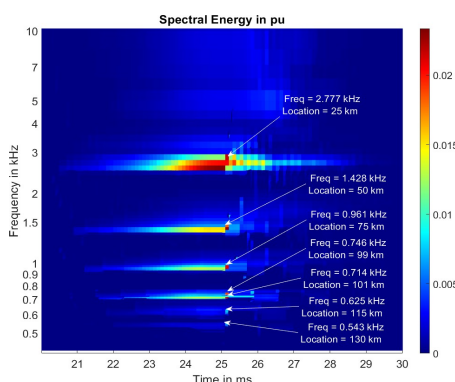


Figure 2: Frequency-time curve of fault transient signals for different fault locations

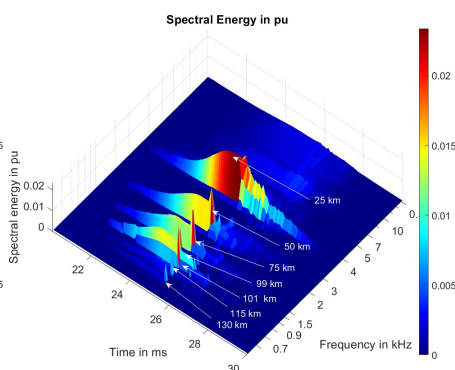


Figure 3: Spectral energy magnitude behavior

The frequency characteristic of the transient signal as a function of the fault distance is a key piece for fault identification; therefore, the development of the distance protection algorithm using the high frequency transient signals is possible. This process identify the protection zones based on a logical scheme using a frequency threshold and spectral energy threshold.

- [1] M. M. Islam, P. Sanjeevikumar, J. K. Pedersen, and C. W. Brice, "Advanced digital signal processing based transmission line fault detection and classification," in IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, vol. 1, pp. 4991–4996, 2019.
- [2] S. F. Huang and X. G. Wang, "A fault location scheme based on spectrum characteristic of fault-generated high-frequency transient signals," in 2009 IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1–5, 2009.
- [3] J. C. Quispe H., J. Morales and E. Orduña, "MRA of Fault-generated High-frequency Transient Signals using Mathematical Morphology. Comparison with Wavelet Transform," 2022 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON), 2022, pp. 1-8.



Yinan Zhang, M. Sc.

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

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutzaufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

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, the influence of current limiting methods of VSM on the distance protection algorithms is analyzed [2]. The investigation is carried out in the network model as shown in Fig. 1. The VSM on the left side is through a 20 kV/0.4 kV transformer and the power lines part 1 and 2 connected to the 10 kV power grid on the right side.

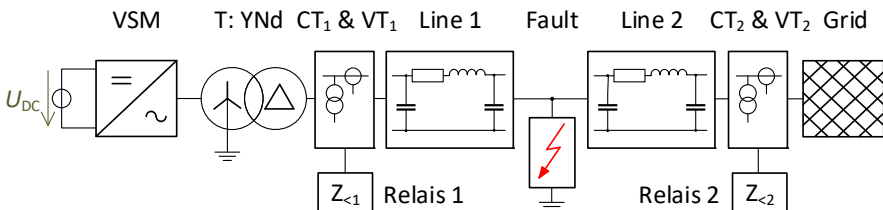


Figure 1: Simulation network model [2]

A two-phase fault at 85 % of the line is simulated in the network model on the medium voltage side between line 1 and line 2, respectively with conventional VSM vector amplitude limitation (VAL) [3] current limiting methods and adjusted current limiting methods regarding both the positive and negative sequence signals [2]. The voltage and current signals at relay 1 are measured for the calculation of positive sequence impedance.

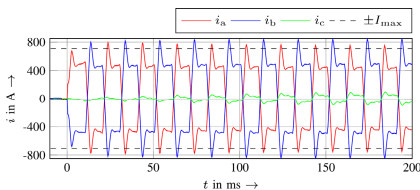


Figure 2: two-phase fault current of conventional current limiting method VAL

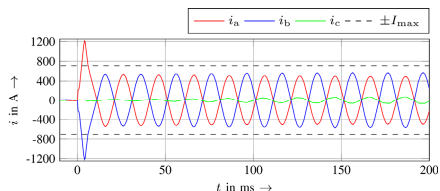


Figure 3: two-phase fault current of improved current limiting method

It is shown from the simulation that the conventional current limiting method VAL introduces non-sinusoidal signals with harmonics to the phase current as shown in Fig. 2. The reaction of distance protection algorithms Phadke-Ibrahim and Lobos on the signals is presented in Fig. 4. The robustness of the Phadke-Ibrahim algorithm against harmonics is verified through the small dispersion, whereas the Lobos algorithm is significantly influenced by the harmonics in the signal. Due to the strong oscillation of the result, the Lobos algorithm is not suitable for a reliable impedance calculation.

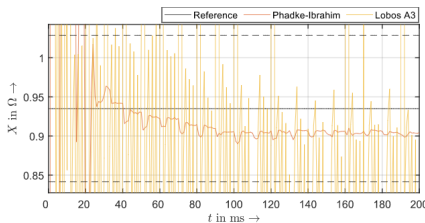


Figure 4: Comparison of short circuit impedance with VAL current limiting method

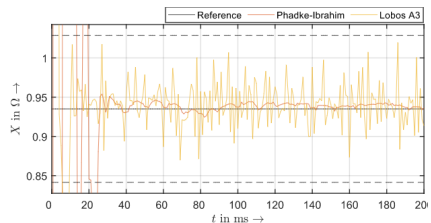


Figure 5: Comparison of short circuit impedance with new current limiting method

In the case of improved current limiting method, the two-phase fault current is maintained sinusoidal as shown in Fig. 3. The reaction of the distance protection algorithms to the signals is presented in Fig. 5. The Phadke-Ibrahim algorithms shows a good performance, whereas massive improvements regarding dispersion of the Lobos algorithm is noted. It is concluded from the study that the implemented VSM current limiting methods has improved the impact on the distance protection algorithms in case of unbalanced faults.

Minimal deviation of impedance calculation in the aforementioned study was observed and triggers the mathematical analysis of the network model in Fig. 1 as further investigations. Through mathematical calculation of the deviation of line reactance between the theoretical value and the relay measurements in the symmetrical components systems, it is possible to systematically analyze the influence of parameters like the load impedance, VSM modelling and line characteristics on the distance protection algorithms in different fault scenarios.

- [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] 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. In: PESS & PELSS 2022, Kassel, 2022.
- [3] A. Gkountaras, S. Dieckerhoff and T. Sezi, "Evaluation of current limiting methods for grid forming inverters in medium voltage microgrids," 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015, pp. 1223-1230, doi: 10.1109/ECCE.2015.7309831.

Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Smart Grid“



Laura Fiedler, Dipl.-Ing.

Entwicklung eines Transformatormodells in natürlichen Größen basierend auf Typenschildangaben und wenigen Kern-Geometriedaten

Für möglichst exakte Berechnungen elektrischer Netze, insbesondere in Niederspannungsnetzen, ist die Berücksichtigung von Betriebsmittelunsymmetrien von großer Bedeutung. Das vorgestellte Zweiwicklungstransformator-Modell in natürlichen Größen kann eben diese Unsymmetrie abbilden. Dabei wurde die Anzahl der notwendigen Betriebsmittel-Parameter geringgehalten. Neben den Typenschildangaben inkl. der Werte des Kurzschluss- und Leerlaufversuchs bedarf es Informationen über den Transformator kern. Dabei muss besonders hervorgehoben werden, dass zur Berücksichtigung der Unsymmetrie lediglich die Abmessungen des Kerns beziehungsweise sogar nur das Verhältnis der Längen und Querschnitte der Schenkel und Joche zueinander benötigt werden. Der Transformator lässt sich abschließend vollständig über die sogenannte Äußere Transformator-Knotenadmittanzmatrix (AT-KAM) beschreiben, welche die tatsächlichen Klemmenspannungen und -ströme miteinander in Verbindung setzt (Bild 1). Primär dient dieses Modell zur Untersuchung stationärer und quasi-stationärer Zustände bei Grundfrequenz.

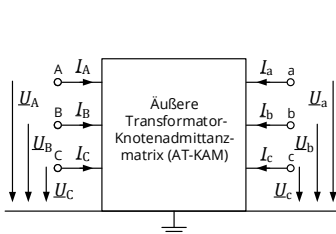


Bild 1: Transformator (als Blackbox) mit Bezeichnung der tatsächlichen Anschlussklemmen

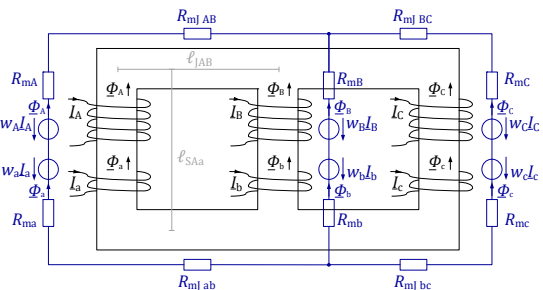


Bild 2: Magnetischer Ersatzkreis eines unsymmetrischen Dreiphasen-Kern-Transformators in Analogie zum Eisenkreis unter Vernachlässigung der Streuung

Es wurden sowohl symmetrische Transformatoren als auch unsymmetrische Transformatorbänke und Dreiphasen-Kern-Transformatoren mit der Methodik modelliert. Die Berechnungen für einen unsymmetrischen Dreiphasen-Kern-Transformator sind im Weiteren erläutert. Zunächst wird entsprechend der Kernbauform ein magnetischer Ersatzkreis der unverschalteten Wicklungen aufgestellt. Die Streueluktanzen sind hier wegen zumeist unzureichender Informationen vernachlässigt worden, könnten jedoch bei Vorhandensein der Windungszahlen w und der Permeabilität des Eisens berücksichtigt werden. Analytische Betrachtungen zeigen, dass eine Extraktion der Selbst- und Gegenreaktanzen aus den mit Hilfe

der Flussteilerregel und des Überlagerungssatzes aufgestellten Flüsse ϕ_i auch ohne die Permeabilität des Eisens und die Windungszahlen möglich ist. Lässt sich eine Reluktanz des Eisenkreises R_m aus der Länge ℓ , dem Querschnitt A und der Permeabilität des Eisenabschnittes μ_{Fe} bestimmen ($R_m = \ell / (\mu_{Fe} \cdot A)$), dann kann bei einer Reihen- oder Parallelschaltung aus Eisenteilen mit derselben Reluktanz, die Permeabilität separiert werden. Folglich kürzen sich die Permeabilitäten auch aus Quotienten der Selbst- und Gegenreaktanzen, die durch das Aufstellen der Spannungen gewonnen werden, weg. Dies wird sich im Folgenden zu Nutze gemacht. Die Spannung über Wicklung A berechnet sich beispielsweise wie folgt:

$$u_A(t) = \frac{w_A^2}{R_{m \text{ res } A}} \cdot \frac{di_A(t)}{dt} - \frac{w_A w_B m_{AB}}{R_{m \text{ res } B}} \cdot \frac{di_B(t)}{dt} - \frac{w_A w_C m_{AC}}{R_{m \text{ res } C}} \cdot \frac{di_C(t)}{dt} + \frac{w_A w_a}{R_{m \text{ res } a}} \cdot \frac{di_a(t)}{dt} - \frac{w_A w_b m_{Ab}}{R_{m \text{ res } b}} \cdot \frac{di_b(t)}{dt} - \frac{w_A w_c m_{Ac}}{R_{m \text{ res } c}} \cdot \frac{di_c(t)}{dt} \quad (1)$$

Dabei werden die aus der Flussteilerregel resultierenden Reluktanzen mit $R_{m \text{ res } j}$ und die resultierenden Quotienten mit m_{ij} bezeichnet. Grau hinterlegt zeigen sich die Selbst- und Gegeninduktivitäten. Analog dazu lassen sich auch die Spannungen der anderen Wicklungen aufstellen. Nach dem Übergang zu komplexen Größen und dem Umrechnen der Reaktanzen auf die Oberspannungsseite ergibt sich die Reaktanzenmatrix X_h (dabei gilt: $w_A = w_B = w_C = w_p$, Index p – primärseitig, hier gleichgesetzt mit oberspannungsseitig):

$$X_h = \omega w_p^2 \cdot \begin{pmatrix} 1 & -m_{AB} & -m_{AC} & 1 & -m_{Ab} & -m_{Ac} \\ -m_{BA} & 1 & -m_{BC} & -m_{Ba} & 1 & -m_{Bc} \\ -m_{CA} & -m_{CB} & 1 & -m_{Ca} & -m_{Cb} & 1 \\ 1 & -m_{aB} & -m_{aC} & 1 & -m_{ab} & -m_{ac} \\ -m_{bA} & 1 & -m_{bC} & -m_{ba} & 1 & -m_{bc} \\ -m_{cA} & -m_{cB} & 1 & -m_{ca} & -m_{cb} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1/R_{m \text{ res } A} \\ 1/R_{m \text{ res } B} \\ 1/R_{m \text{ res } C} \\ 1/R_{m \text{ res } a} \\ 1/R_{m \text{ res } b} \\ 1/R_{m \text{ res } c} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Jedes Element dieser Matrix wird nun durch das oberste linke Element X_{hAA} ($= \omega w_p^2 / R_{m \text{ res } A}$) geteilt. Die so entstandene Matrix G ($= X_h / X_{hAA}$) hat den Vorteil, dass sie unabhängig von der Permeabilität und der primärseitigen Windungszahl w_p ist und durch weitere Schritte mit den Werten des Typenschildes sowie des Kurzschluss- und Leerlaufversuchs zusammengeführt werden kann. Es gilt nun eine Matrix aufzustellen, welche die Selbst- und Gegenimpe-

$$\begin{pmatrix} 1 & -0,75 & -0,25 & 1 & -0,75 & -0,25 \\ -0,75 & 1,5 & -0,75 & -0,75 & 1,5 & -0,75 \\ -0,25 & -0,75 & 1 & -0,25 & -0,75 & 1 \\ 1 & -0,75 & -0,25 & 1 & -0,75 & -0,25 \\ -0,75 & 1,5 & -0,75 & -0,75 & 1,5 & -0,75 \\ -0,25 & -0,75 & 1 & -0,25 & -0,75 & 1 \end{pmatrix}$$

Bild 3: Matrix G beispielhaft für einen unsymmetrischen Dreiphasen-Kern-Transformator mit quadratischen Fenstern und gleichen Joch- und Schenkelquerschnitten

pedanzen aller offenen Wicklungen zueinander darstellt. Zur Überführung der skalaren Matrix G wird sie mit der Querimpedanz Z_m (berechnet aus dem relativen Leerlaufstrom und den Eisenverlusten) multipliziert und zusätzlich mit einem Korrekturfaktor zur Einhaltung des Typenschild-Leerlaufstroms skaliert. Anschließend werden die Streureaktanzen und Wicklungswiderstände aus den Werten des

Kurzschlussversuchs in die Diagonalelemente einbezogen. Diese Matrix, die sogenannte Transformator-Schleifenimpedanzmatrix (T-SIM), wird durch invertieren und Einbeziehen der Schaltgruppen-Informationen mittels Matrizenmultiplikation zur AT-KAM umgeformt, welche dem vollständigen Transformatormodell entspricht. Eine Weiterentwicklung des Modells für Dreiwicklungstransformatoren ist geplant.



Marcus Kreutziger, Dipl.-Ing.

Smart-Grid IKT-Plattform zur Integration von Elektrofahrzeugen

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Transformation des Elektroenergiesystems aufgrund der Energiewende führt zu veränderten Strukturen hinsichtlich Verbrauch und Erzeugung in Niederspannungsnetzen. Eine verstärkt dezentrale Energieerzeugung sowie die Zunahme leistungsstarker Verbrauchsanlagen, wie Elektrofahrzeuge und Wärmepumpen, erfordert die Entwicklung neuer Technologien für diese Netzebene, z. B. Konzepte für ein aktives Netzmanagement.

Hierfür wurde eine Smart Grid IKT-Plattform konzipiert, um Feldmessdaten aufzunehmen und damit den Grad der Beobachtbarkeit zu steigern. Dies bildet die Grundlage für ein anschließendes Engpassmanagement. Die Implementierung wurde für ein Pilotnetz über vier Schritte realisiert.

1. Ermittlung einer Messkonfiguration
2. Ausbringung von Feldmesstechnik und kommunikationstechnische Anbindung
3. Datenaufnahmen, -speicherung und -visualisierung
4. Netzmonitoring und kuratives Netzmanagement

Schritt 1: Ermittlung einer Messkonfiguration

Um ausreichend Messinformationen für die Netzzustandsermittlung eines Niederspannungsnetzes bereitzustellen werden Messgeräte benötigt. Die Auswahl geeigneter Messpositionen innerhalb des Pilotnetzes war jedoch durch bauliche Einschränkungen stark eingegrenzt. Somit wurden Messgeräte an allen technisch möglichen Einbauorten installiert.

Schritt 2: Ausbringung der Feldmesstechnik und kommunikationstechnische Anbindung

Der Einbau der Messgeräte erfolgte in der Umspannstation (UST), in mehreren Kabelverteilern (KVT) und in einer Ladestation (LST) für Elektrofahrzeuge. Hier wurde jeweils 1-Minuten-Mittelwerte aller relevanten Messgrößen (u.a. Ströme, Spannungen, Leistungen) aufgenommen. Die Messdaten werden anschließend von den Messgeräten an die IKT-Plattform übertragen. Die Übertragung erfolgte dabei mittels unterschiedlicher Technologien und einer Vielzahl von Protokollen. Ein Überblick der Systemarchitektur ist in Bild 1 dargestellt.

Schritt 3: Datenspeicherung, -verarbeitung und -visualisierung

Die Plattform stellt einen MQTT-Broker für den Empfang der Messdaten bereit. Die Datenspeicherung erfolgt in einer InfluxDB Datenbank. Die Daten werden mit Hilfe von Grafana visualisiert. Zusätzlich wurde eine Anzeige für Statusinformationen sowie verschiedene Alarmfunktionen (z. B. Verbindungsunterbrechungen oder fehlende Messdaten) eingerichtet. Die Datenbank bildet die Grundlage für die Algorithmen der Netzzustandsberechnung und des Engpassmanagements.

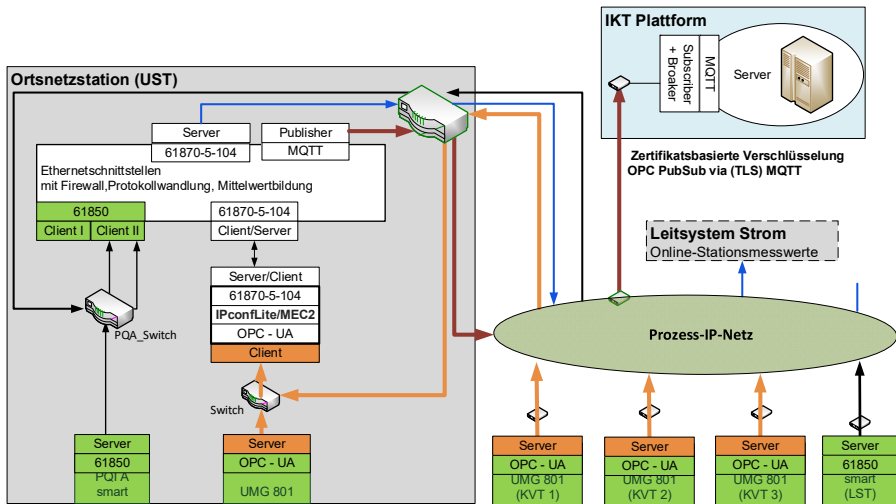


Bild 1: Systemarchitektur der IKT-Plattform (nach [1])

Schritt 4: Netzmonitoring und kuratives Engpassmanagement

Etablierte Methoden zur Netzzustandsberechnung für Hoch- und Höchstspannungsnetze können nicht direkt für die Niederspannungsebene übernommen werden. Die Herausforderung besteht darin, den Netzzustand mit wenigen Messinformationen und einer hinreichenden Genauigkeit zu bestimmen. Hierfür wurde ein Berechnungsmodell zur mehrphasigen Netzzustandsberechnung mit einer neuartigen Beschreibung fehlender oder unvollständiger Messgrößen eingesetzt [2]. Für das aktive Engpassmanagement wurde ein Algorithmus entwickelt, der die Flexibilität von Elektrofahrzeugen verwendet, um unzulässige Strom-, bzw. Spannungswerte zu verhindern. Dabei soll der Eingriff auf den regulären Betriebspunkt der LST so gering wie möglich ausfallen [3].

Die Algorithmen wurden mittels Docker-Containern auf der IKT-Plattform implementiert und erfolgreich getestet.

- [1] Schmidt, M. Kreutziger, M. et.al.; A smart grid ICT platform for integrating electric vehicles—first results of a field test, CIREP workshop on E-mobility and power distribution systems; Porto 2022, Portugal.
- [2] Schmidt, M.; Schegner, P.: Deriving power uncertainty intervals for low voltage grid state estimation using affine arithmetic. Electric Power Systems Research, Vol. 189. 2020.
- [3] Zimmermann, N.: Entwicklung einer Strategie zur Ladekoordination für die netzdienliche Integration von E-Fahrzeugen. Diplomarbeit, 2020.
- [4] IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors, IEEE Std. 1036-2010, Sep. 2010.



Marta Sophia Potyka, Dipl.-Ing.

Prognosemodell einer PV-Anlage mittels Machine-Learning Verfahren

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Durch einen stetigen Zuwachs an erneuerbaren und damit zumeist volatilen Erzeugungsanlagen 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, Erzeugungsanlagen abzuregeln. In Hinblick auf die derzeitige Energiekrise erscheint es allerdings verschwenderisch, verfügbare elektrische Leistung nicht zu nutzen. Deshalb wurde ein Prognosemodell der elektrischen Wirkleistung einer PV-Anlage entwickelt. Damit das Modell möglichst breitflächig genutzt werden kann, verzichtet es auf eine exakte physikalische Modellierung, sondern bedient sich der Zeit- sowie prognostizierten Wetterdaten als Eingangsparameter. Die relevanten Wetterdaten werden über das *Climate Data Center* des Deutschen Wetterdienstes [1] bezogen. Der Eingangsdatensatz umfasst 30 Tage.

Für diese kurze Zeitspanne eignen sich bspw. keine künstlichen neuronalen Netze, jedoch einige Machine-Learning (ML) Verfahren wie die multiple lineare Regression (MLR), multiple polynomielle Regression (MPR), die k-nächste Nachbarn Methode oder die Support Vector Regression (SVR). Die genannten Verfahren wurden in der hier vorliegenden Untersuchung angewendet.

Als Eingangsparameter wurden:

- die Globalstrahlung G ,
- die Umgebungstemperatur auf 2 m Höhe T_U
- die mittlere Windgeschwindigkeit v_W
- und optional der Azimutwinkel γ

ausgewählt.

Zur Bewertung der Ergebnisse wurde der normierte *Mean Absolute Percentage Error* (MAE%) ausgewählt. Dieses Gütekriterium ist in Gl. (1) definiert. Dabei ist $\hat{P}_n$ die prognostizierte Leistung im Zeitschritt, P_n die wirklich eingetretene Leistung im Zeitschritt und P_r die Bemesungsleistung der PV-Anlage.

Die Standardabweichung σ wurde ebenso zur Gütebewertung herangezogen.

$$MAE\% = \frac{1}{N} \frac{\sum_{n=1}^N |\hat{P}_n - P_n|}{P_r} \quad (1)$$

Das jeweils beste Ergebnis der vier verschiedenen Verfahren ist in Tabelle 1 eingetragen. Der Vergleich der Verfahren zeigt, dass sie sich bezüglich des Prognosefehlers und der Standardabweichung teilweise nur wenig unterscheiden. Dennoch liefert die geringsten Fehler die k-nächste Nachbarn Methode. Die SVR ist fast genauso gut und die anderen beiden Verfahren folgen in einigem Abstand. Interessant ist, dass die k-nächste Nachbarn Methode und die SVR am besten prognostizieren, wenn sie alle Eingangsparameter zur Verfügung haben, während die MLR und die MPR schon mit weniger Parametern ihr optimales Ergebnis erreichen.

Tabelle 1: Ergebnisse der ML-Verfahren für das PV-Prognosemodell

ML-Verfahren	Eingangsparameter	Hyperparameter	$MAE\%_{\text{Min}}$ in %	σ in kW
MLR	G, γ	-	1,12	0,13
MPR	G, T_U, v_W	Ordnung 6	1,04	0,09
k-nächste Nachbarn Methode	G, T_U, v_W, γ	gewichtet, Manhattan-Distanz, $k=3$	0,81	0,075
SVR	G, T_U, v_W, γ	RBF-Kernel, $C = 20, \varepsilon = 0$	0,89	0,094

Die Parameter für das gewählte k-nächste Nachbarn Modell lauten wie folgt:

- Eingangsparameter: Globalstrahlung, Umgebungstemperatur auf 2 m Höhe, mittlere Windgeschwindigkeit, Azimutwinkel
- Parameter des Modells (Hyperparameter): gewichtete Methode, Manhattan-Distanz, Anzahl berücksichtigter nächster Nachbarn $k = 3$

Die ausgewählte Variante der k-nächste Nachbarn Methode wurde auf alle Wetterparameter angewendet. Dabei diente der November 2021 als Trainingsdatensatz und der 01.-11. Dezember 2021 als Testdatensatz. Es wird ein MAE% von 6,98 % auf die vorhergesagten und 1,79 % auf die tatsächlich eingetretenen Wetterdaten erreicht. Verständlich ist, dass das Ergebnis mit den tatsächlich eingetretenen Wetterdaten deutlich besser ist, da es bei den Wetterprognosen genauso Unschärfen gibt.

Für weiterführende Informationen zur Untersuchung sei auf [2] verwiesen.

[1] https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/cdc_node.html

[2] M.S. Potyka, H. Seefluth, P. Schegner, "Prognosemodell einer PV-Anlage basierend auf einem Kurzzeitmesssystem, Wetterdaten und Machine-Learning Verfahren", 17. Symposium Energieinnovation, Graz, 2022.



Sasan Jacob Rasti, Dipl.-Ing.

**Aggregation von Flexibilitäten in
zellularen Energiesystemen unter
Berücksichtigung von Netzrestriktionen
mithilfe von Reinforcement Learning**

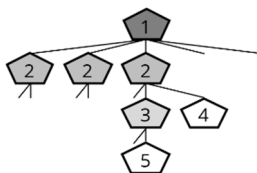
Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Aufgrund der Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels verändern sich Energiesysteme in vielerlei Hinsicht, z. B. Umstellung der Energieerzeugung auf erneuerbare Energiequellen, Austausch von Verbrennungsmotoren durch Elektroantriebe und Einsatz von Wärmepumpen zur Beheizung von Gebäuden. Als eine Konsequenz wird die Energieerzeugung zunehmend wetterabhängiger und volatil. Außerdem werden Energiesektoren, die traditionell getrennt betrachtet wurden, miteinander gekoppelt. Um diese Herausforderungen zu meistern, ist es notwendig, verfügbare Flexibilitäten der Energieerzeugung, -speicherung und -anwendung zu nutzen sowie Energiesektoren gemeinsam zu planen und zu betreiben. Zu diesem Zweck hat der Ansatz der zellularen Energiesysteme [1] in der Forschung und öffentlichen Diskussion an Bedeutung gewonnen. Zellulare Energiesysteme (Bild 1) sind ein Konzept, in dem die Energieinfrastruktur (Anlagen und Versorgungsnetze) als verbundene Zellen strukturiert wird. Die Energienutzung kann dann innerhalb einer Zelle optimiert werden.



- 1: Hochspannungsnetzzone
- 2: Mittelspannungsnetzzone
- 3: Niederspannungsnetzzone
- 4: Gewerbezone
- 5: Haushaltszone

Bild 1: Abstrakte Struktur eines zellularen Energiesystems

Mathematisch kann die Leistungsflexibilität $\langle P \rangle$ einer Zelle für einen Energieträger unter Zuhilfenahme von Affiner Arithmetik wie folgt angegeben werden [2]:

$$\langle P \rangle = P^l + P^m \cdot \varepsilon \quad (1)$$

P^l ist der Leistungsmittelpunkt, P^m die mögliche Leistungsänderung um den Leistungsmittelpunkt und ε der Arbeitspunkt, ein symbolisches Intervall, das zwischen $-1 \dots 1$ liegt.

Aufgrund von einzuhaltenden Netzrestriktionen (Leitungsauslastung, maximale Transformatorleistung, zulässiges Spannungsband) muss diese Flexibilität allerdings in vielen Fällen eingeschränkt werden, sodass ein zulässiger Betrieb garantiert ist. Um angepasste Flexibilitätsgrenzen zu bestimmen, wurde ein Verfahren, das auf *Reinforcement Learning* (RL) basiert, entwickelt und anhand eines Szenarios ausgewertet [3]. Dabei werden für Last- und Erzeugungssituationen theoretische Leistungsbereiche der einzelnen Zellen aufgestellt und dem *RL-Agent* als Input zur Verfügung gestellt. Anschließend wählt der *Agent* für jede Zelle einen minimalen und maximalen Arbeitspunkt, welche den reduzierten Leistungsbereich begrenzen. Dieser wird mit einer Netzberechnung geprüft, deren Ergebnis den *Reward* bestimmt,

den der *Agent* für seine Wahl erhält. Anhand diesem „lernt“ der *Agent*, mit welchem reduzierten Leistungsbereich er am besten auf einen theoretischen reagieren sollte. Der *Reward* ist umso höher, je näher der resultierende Leistungsbereich dem theoretischen ist, bzw. je näher eine Größe an ihrem zugehörigen Grenzwert. Bei Verletzung der Restriktionen wird der *Reward* negativ (Bild 3). Dies wird wiederholt, bis das Verhalten konvergiert und die Lernphase abgeschlossen ist (siehe Bild 2)

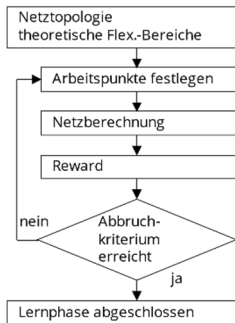
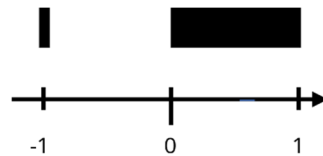
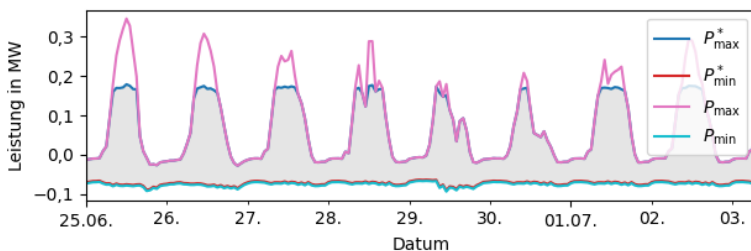


Bild 2: Ablauf Flexibilitätsaggregation

Bild 3: Wertebereich *Reward* [3]

Die resultierenden Flexibilitätsbereiche für ein untersuchtes Szenario sind in Bild 4 dargestellt. Hier ist vor allem eine hohe PV-Einspeisung für die Überschreitung der zulässigen Spannung verantwortlich. Der *Agent* reduziert diese Leistungen in einer Inferenzzeit von unter einer Sekunde – und damit je nach Netztopologie bis zu mehrere Größenordnungen schneller als iterative Verfahren – um die zur Einhaltung der Netzrestriktionen erforderlichen Werte und bestimmt somit ein zulässiges Flexibilitätsband.

Bild 4: Verlauf für theoretische (P) und resultierende (P^*) Leistungsbereiche am Übergabepunkt der untersuchten Niederspannungsnetzzeile [3]

- [1] T. Benz et al., "Der zelluläre Ansatz," VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., Studie, 2015.
- [2] S. J. Rasti und P. Schegner, "A Novel Approach to describe and aggregate Multi-Energy Flexibility in Cellular Energy Systems using Affine Arithmetic," in ETG-Kongress 2021, Wuppertal, Germany, 2021.
- [3] N. Hartmann. Entwicklung eines Algorithmus zur Aggregation von energetischer Flexibilität mittels Machine Learning Verfahren unter Berücksichtigung des elektrischen Netzes. Dresden: IEEH, TU Dresden, 2022.



Maximilian Schmidt, Dipl.-Ing.

Ermittlung der Außenleiterzuordnung in Niederspannungsnetzen mit Hilfe von Spannungsmessreihen und Clustering-Verfahren

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

In Anbetracht der politischen Zielsetzung, die installierte Anzahl von Wärmepumpen, Elektrofahrzeugen und Photovoltaik-Anlagen signifikant zu steigern, gewinnt die Überwachung des Netzzustandes von Niederspannungsnetzen zunehmend an Bedeutung. Neben konventioneller Messtechnik des Netzbetreibers kann zukünftig den intelligenten Messsystemen (iMSys) eine bedeutende Rolle bei der Erfassung von Netzzustandsdaten zukommen. Eine vollständige messtechnische Erfassung analog zu Hoch- und Höchstspannungsnetz ist in Niederspannungsnetzen weder volkswirtschaftlich vertretbar, noch technisch notwendig. Mit Hilfe von nur wenigen Messinformationen an ausgewählten Positionen ist es möglich, den Netzzustand in hinreichender Genauigkeit für eine anschließende Engpassbewertung zu ermitteln. Die dazu eingesetzten numerischen Berechnungsverfahren benötigen dabei einen konsistenten Datensatz der im Niederspannungsnetz verteilten Messtechnik. Für gewöhnlich wird bei der Inbetriebnahme eines Netzanschlusses das Vorhandensein eines Rechtsdrehfeldes der Außenleiterspannungen geprüft. Infolge von z. B. Bau- oder Reparaturmaßnahmen kann allerdings die tatsächliche Zuordnung der Außenleiter variieren. Wie in Bild 1 beispielhaft dargestellt, wurden die Außenleiter L1 und L3 in der Kabelmuffe vertauscht. Ein Messgerät im Kabelverteiler würde folglich ein Linksdrehfeld detektieren. Durch Kreuzen der Außenleiter L2 und L3 wird in diesem Beispiel am Hausanschluss das Rechtsdrehfeld wiederhergestellt. Dieses unterscheidet sich allerdings hinsichtlich der Außenleiterzuordnung von jenem der Ortsnetzstation.

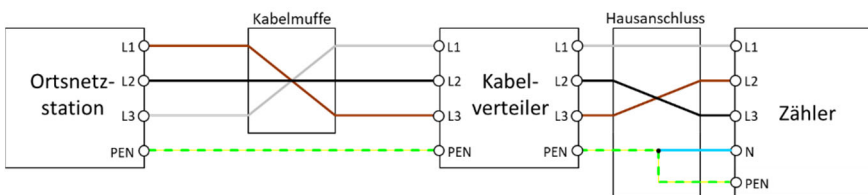


Bild 1: Schematische Darstellung möglicher Außenleiterkreuzungen im Niederspannungsnetz

Zur Erkennung dieser Inkonsistenzen ist bisher der Einsatz von Spezialmesstechnik erforderlich, die z. B. auf einer Signalmodulation mit Sende- und Empfangsgerät oder dem Vergleich der Phasenlage mit Hilfe von *Phasor Measurement Units* basiert. Als Alternative zu diesen aufwands- und kostenintensiven Verfahren wird ein automatisiertes Analyseverfahren vorgeschlagen, das mit Hilfe von Spannungsmessreihen und Clustering-Verfahren die korrekte Außenleiterzuordnung bestimmt.

Das Zuordnen von Spannungsmessreihen zu den drei Außenleitern kann als Klassifikationsproblem verstanden werden. Aufgrund der elektrischen Eigenschaften des Niederspannungsnetzes besitzen gleiche Außenleiter an unterschiedlichen Positionen im Netz einen ähnlichen Spannungsverlauf. Die „Ähnlichkeit“ von Spannungsverläufen wird anhand von Proximitätsmaßen bewertet, die auf Distanzmaßen oder Korrelationsmaßen beruhen. Im Rahmen der Algorithmenentwicklung wurden verschiedene Proximitätsmaße untersucht und gegenübergestellt. Der Ergebnisse zeigen, dass sich insbesondere das Korrelationsmaß basierend auf dem Pearson Korrelationskoeffizienten empfiehlt.

Die Klassifikation der Spannungsmessreihen erfolgt mit Hilfe des *constrained k-Means Algorithmus*, dessen Ablauf in Bild 2 skizziert ist. Zunächst werden drei Clusterzentren mit Hilfe einer Referenzmessung initialisiert, die den jeweiligen Außenleitern $\{L1, L2, L3\}$ entsprechen. Für die Zuordnung der drei Spannungsmessreihen an einem Messort werden jeweils die Proximitätsmaße zu allen Clusterzentren berechnet. Anschließend wird zuerst diejenige Spannungsmessreihe einem Cluster zugeordnet, die das geringste Proximitätsmaß aufweist. Das ausgewählte Cluster steht anschließend für die Zuordnung der übrigen Spannungsmessreihen nicht mehr zur Verfügung. Nach erfolgter Zuordnung werden die Clusterzentren durch Mittelwertbildung neu berechnet und der Ablauf solange wiederholt, bis sich das Clusterzentrum nicht mehr signifikant ändert. Als Ergebnis resultiert die Clusterzuordnung, die als Zuordnung der Spannungsmessreihen zu den drei Außenleitern interpretiert wird. Tabelle 1 zeigt die Klassifikationsergebnisse von sieben Messorten in einem Niederspannungsnetz basierend auf einem Betrachtungszeitraum von jeweils 24 h. Dabei wurde Messort M1 als Referenz zur Initialisierung der Clusterzentren gewählt.

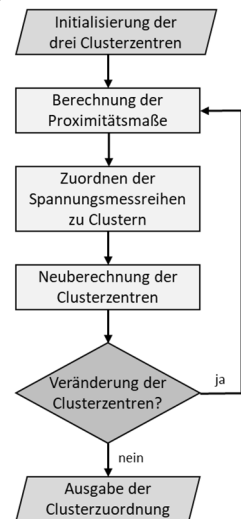


Bild 2: Ablaufdiagramm der Außenleiterzuordnung

Aus dem Ergebnissen wird deutlich, dass in diesem Niederspannungsnetz an drei Messorten Kreuzungen der Außenleiter vorliegen, die jeweils ein Rechtsdrehfeld bilden. Hervorzuheben ist weiterhin, dass anhand der Höhe des Proximitätsmaßes d nachgewiesen werden konnte, dass der Messort M7 von einer anderen Ortsnetzstation versorgt wird. Das Proximitätsmaß unterscheidet sich in diesem Fall um eine Größenordnung.

Tabelle 1: Ergebnisse der Außenleiterzuordnung

Messort	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
L1	L1	L1	L2	L1	L2	L3	X
L2	L2	L2	L3	L2	L3	L1	X
L3	L3	L3	L1	L3	L1	L2	X
d	0,013	0,026	0,021	0,031	0,036	0,058	0,52

Publikationen

Vorträge

M. Domagk, J. Meyer:

Probabilistic study of propagation and summation of harmonics in transmission systems.
17th International Conference of Probabilistic Methods Applied to Power Systems
(PMAPS),
Online, 12.-15.06.2022.

R. Herrmann, Y. Zhang, J. C. Huarcaya Quispe, C. Liebermann:

Übersicht neue Ansätze von Schutzkonzepten für Netze mit hohem Anteil leistungselektronischer Einspeiser - Stand der Wissenschaft und neue Ansätze.
Schutz- und Leittechnik 2022 Online Preview,
Online, 15.02.2022.

E. Kaufhold:

Measurement-based black-box harmonic stability analysis of commercially available single-phase photovoltaic inverter in public low voltage networks.
Interessenverband Netzimpedanz,
Online, 07.04.2022.

P. Wright, D. Ritzmann, A. Gallareta, H. van den Brom, D. Istrate, V. Khokhlov, R. Stiegler, J. Meyer:

Measuring and assessing interference levels for the frequency range (2 to 150) kHz (Supra-harmonics) in power grids.
European Metrology Project 18NRM05 SupraEMI, Final Workshop,
Online, 06.04.2022.

J. Meyer, V. Khokhlov, R. Stiegler:

Forschungsaktivitäten im Frequenzbereich größer 2 kHz.
Vorbereitung eines Forschungsprojektes zur Charakterisierung der frequenzabhängigen Impedanz im NS-Netz im FCC Band, Workshop,
Gmunden, 27.06.2022.

C. Liebermann, P. Schegner:

Auswirkungen ungünstig verdrehter Leitungen - Optimierung der Verdrehung während der Planung.
Dresdner Kreis 2022,
Magdeburg, 15.-16.03.2022.

C. Liebermann, P. Schegner:

Auswirkungen ungünstig verdrehter Leitungen - Optimierung der Verdrehung während der Planung.
BIM in der Infrastruktur Verkehr & Energie 2022,
Dresden, 17.03.2022.

R. Stiegler:
 Grid impedance measurements in household environment.
 6. Konferenz Interessensverband Netzimpedanz,
 Hamburg, 15.10.2022.

Veröffentlichungen

M. Domagk, J. Meyer, T. Wang, D. Feng, W. Huang, H. Mayer, S. Wenig, M. Lindner, J. Amrhein:
 Trend analysis for power quality parameters based on long-term measurement campaigns.
 2022 20th International Conference on Harmonics & Quality of Power (ICHQP),
 Neapel, Italien, 29.05.-01.06.2022.

M. Domagk:
 Powerfactory Utils - A toolbox for Python based control of DigSILENT PowerFactory.
 Zenodo,
 Online, 2022.

S. Kannan, J. Meyer, J. Rens, P. Schegner:
 A Novel Extended Noninvasive Harmonic Resonance Detection Technique for Public Low-Voltage Networks.
 IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Ausgabe 71, S. 1-11, 2022,
 2022.

S. Kannan, J. Meyer, P. Schegner:
 A Detailed Simulation Model of Residential LV Networks for Harmonic Resonance Studies.
 IEEE 13th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG),
 Online, 2022.

S. Kannan, J. Meyer, P. Schegner:
 A Measurement-based Aggregated Simulation Model of Residential LV Networks for Harmonic Resonance Studies.
 AMPS 2022,
 Online, 2022.

S. Scholtz, S. Kannan, J. Meyer:
 Harmonic Resonance Characteristics of a Residential Low Voltage Distribution Network Considering Typical Variations of Grid and Customer Characteristics.
 20th International Conference on Harmonics & Quality of Power (ICHQP),
 Online, 2022.

- A. S. Abdelsamad, J. M. A. Myrzik, E. Kaufhold, J. Meyer, P. Schegner:
Comparison of harmonic models for a commercial battery energy storage system in charging and discharging mode.
20th International Conference on Harmonics & Quality of Power (ICHQP),
Neapel, Italien, 29.05.-01.06.2022.
- Z. Iqbal, S. Djokic, J. Meyer, S. Müller, E. Kaufhold:
Filter and Controller Identification for Stability Analysis of a Grid-Connected 3-Phase PV Inverter.
20th International Conference on Harmonics & Quality of Power (ICHQP),
Neapel, Italien, 29.05.-01.06.2022.
- E. Kaufhold, C. A. Duque, J. Meyer, P. Schegner:
Measurement-Based Black-Box Harmonic Stability Assessment of Single-Phase Power Electronic Devices Based on Air Coils.
IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,
17.03.2022.
- E. Kaufhold, J. Meyer, P. Schegner:
Measurement-based stability analysis of single-phase PV-inverters in low-voltage grids. Solar,
10.03.2022.
- E. Kaufhold, J. Meyer, P. Schegner:
A modular time-domain model of single-phase photovoltaic inverters enabling realistic harmonic large-scale simulations in low voltage networks.
20th IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (IEEE-PEMC 2022),
Brasov, Romania, 25.09.-28.09.2022.
- A. Gallarreta, I. Fernandez, D. Ritzmann, S. Lodetti, V. Khokhlov, J. Meyer, D. de la Vega:
A Light Measurement Method for 9-150 kHz Disturbances in Power Grids Comparable to CISPR Quasi-Peak.
IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,
44774.
- A. Gallarreta, I. Fernandez, D. Ritzmann, S. Lodetti, V. Khokhlov, J. Meyer, D. de la Vega:
Adaptation of the IEC 61000-4-7 Measurement Method to CISPR Band A (9-150 kHz).
12th IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS),
Cagliari, 28.-30.09.2022.
- V. Khokhlov, F. Möller, J. Meyer, P. Schegner:
Immunity of Mass-market Electrical Appliances to Harmonic Distortion of the Supply Voltage.
20th International Conference on Harmonics & Quality of Power (ICHQP),
Neapel, 29.05-01.06.2022.

- S. Lodetti, P. Davis, D. Ritzmann, P. Wright, V. Khokhlov, J. Meyer, D. Istrate, H. van den Brom, R. van Leeuwen, A. Gallarreta, D. de la Vega:
Comparison of household appliances voltage emissions to compatibility levels in the 2 kHz to 150 kHz range.
Conference on Precision Electromagnetic Measurements,
Wellington, 12.-16.12.2022.
- S. Lodetti, P. Davis, D. Ritzmann, P. Wright, V. Khokhlov, J. Meyer, D. Istrate, H. van den Brom, G. Ye, R. van Leeuwen, A. Gallarreta, D. de la Vega:
Comparison of laboratory and grid measurements of 9 kHz to 150 kHz appliance emissions.
12th IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS),
Cagliari, 28.-30.09.2022.
- S. Ecklebe, S. Krahmer, K. Röbenack, P. Schegner:
Modellierung von elektrischen Energieübertragungssystemen im Zeitbereich bei der Bereitstellung von Systemdienstleistungen.
at - Automatisierungstechnik, Ausgabe 70, Heft 8, S. 705-718,
2022.
- S. Krahmer, S. Ecklebe, P. Schegner, K. Röbenack:
Analysis of the Converter-Driven Stability of Q(V)-Characteristic Control in Distribution Grids.
2022 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST),
Eindhoven, Niederlande, 05.09. - 07.09.2022.
- P. Merk, S. Schulz, H. Becker, C. Hachmann, I. Hauer, S. Glaser, N. I. Hiersemann, S. Krahmer, S. Schlegel, D. Westermann, P. Schegner:
Wer startet das Netz der Zukunft nach einem Blackout?
ETG Journal 02/2022,
2022.
- M. Kreutziger, S. Wende-von-Berg, S. Krahmer, P. Schegner:
Blindleistungsbereitstellung aus Flächenverteilnetzen – praktische Umsetzung in einem Feldtest.
e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, Ausgabe 139, S. 65–72,
2022.
- C. Liebermann, L. Gnärig, R. Weis, A. Hoffmann, Y. Zhang, R. Herrmann, P. Schegner, S. Bernet:
Current Limiting of Virtual Synchronous Machines on Unbalanced Faults Considering Grid Protection.
PESS+PELSS 2022,
Kassel, 02.-04.11.2022.
- C. Liebermann, M. Meinck, P. Schegner, K. Wenzlaff, G. Achleitner:
Modellierung von sekundären Störlichtbögen.
Schutz- und Leittechnik 2022,
Berlin, 21.-22.06.2022.

S. Müller, S. Li, Q. Zhong, M. Zhu, J. Meyer, W. Huang:

Impact of High Penetration of Fast Charging Stations for Electric Vehicles on Harmonic Disturbance Levels in Distribution Networks.

CIREN 2022 Workshop Shanghai,

Online, 21.-22.09.2022.

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.

CIREN Workshop on E-Mobility and Power Distribution Systems,

Porto, Portugal, 02.06.-03.06.2022.

M. Nilges, S. Krahmer, R. Adam, K. Backhaus, C. Hildmann, S. Rupp, P. Schegner:

Systemkonzepte von DC-Verteilnetzen: Erhöhung der Anschlussleistung von Windparks.

17. Symposium Energieinnovation (EnInnov),

Graz, Österreich, 16.02. - 18.02.2022.

F. Ossevoorth, P. Seidel, S. Krahmer, J. Seifert, P. Schegner, P. Lochmann, L. Oehm, M. Maurermann:

Resilience in supply systems – What the food industry can learn from energy sector.

Journal of Safety Science and Resilience, Ausgabe 2022, Heft 3, S. 39 - 47,

2022.

M. S. Potyka, H. Seefluth, P. Schegner:

Prognosemodell einer PV-Anlage basierend auf einem Kurzzeitmesssystem, Wetterdaten und Machine-Learning Verfahren.

17. Symposium Energieinnovation (EnInnov),

Graz, 2022.

P. Seidel, M. Altenburger, J. Seifert, M.S. Potyka:

Potential assessment of coupling PV electricity with district heating supply of building.

CLIMA 2022: the 14th REHVA HVAC World Congress,

Rotterdam, 22.-25.05.2022.

M. Pourarab, O. Domianus, J. Meyer, T. Naef, R. Rölli, M. Ulrich:

Utilization of Harmonic Emission Limits by Customer Installations in Low and Medium Voltage Networks.

2022 20th International Conference on Harmonics & Quality of Power (ICHQP),

Neapel, Italien, 29.05.-01.06.2022.

A. Schinke-Nendza, F. Flatter, H. Kramer, A. Khalid, B. Uhlemeyer, S. J. Rasti, C. Trossen, S.

Mohammadi, D. Mayorga Gonzalez, U. Spanel, W. Wellssow, C. Weber, M. Zdrallek, P.

Schegner, A. Kubis:

ZellNetz2050 - A Concept for the Efficient and Effective Operation of Multi-Sector Web-of-Cells Energy Systems.

CIGRE Session 2022,

Paris, 2022.

M. Schmidt, M. Kreutziger, C. Winter, J. Jacob, P. Schegner:

A Smart Grid Platform for integrating Electric Vehicles - First Results of a Field Test.
CIRED Workshop on E-Mobility and Power Distribution Systems,
Porto, Portugal, 2022.

R. Stiegler, J. Meyer:

Impact of external influences on the frequency dependent transfer ratio of resin cast MV
voltage instrument transformers.
2022 20th International Conference on Harmonics & Quality of Power (ICHQP),
Neapel, Italien, 29.05.-01.06.2022.

R. Stiegler, J. Meyer, M. Nazemi:

Measurement and simulation of harmonic propagation in transmission systems.
CIGRE Session 2022,
Paris, 29.08.-02.09.2022.

K. Wenzlaff, R. Herrmann, M. Bruhns, P. Schegner, M. Anheuser:

Electrical and non electrical characteristics for the fast detection of high current free-burn-
ing arcs.
Plasma Physics and Technology Journal,
Prag, 44852.

Y. Zhang, R. Herrmann, P. Schegner, C. Liebermann:

Herausforderungen und Schutzkonzepte für Netze mit hohem Anteil leistungselektroni-
scher Einspeiser.
Schutz- und Leittechnik 2022,
Berlin, 21.-22.06.2022.

E. Strunz, O. Zyabkina, J. Meyer:

Application of Machine Learning Methods for Recognition of Daily Patterns in Power Qual-
ity Time Series.
2022 20th International Conference on Harmonics & Quality of Power (ICHQP),
Neapel, Italien, 29.05.-01.06.2022.

O. Zyabkina, M. Domagk, E. Strunz, J. Meyer, T. Wang, D. Feng, W. Huang:

Identification of Disturbance Patterns in Long-term Measurements of Power Quality Char-
acteristics in Chinese Large Cities.
CIRED 2022 Workshop Shanghai,
Online, 21.-22.09.2022.

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

Angewandte Forschung

- Weiterentwickeln von Prüfanforderungen für Betriebsmittel der HGÜ
- Reinigen von Industrieabwässern mittels Hochspannungsentladungen
- Teilentladungsmessung bei Gleich- und Wechselspannung an gasisolierten Systemen und Kabelsystemen
- Untersuchung der Lebensdauer von Isoliersystemen rotierender Hochspannungsmaschinen
- Einfluss hoher Frequenzen auf das dielektrische Verhalten

Strombelastbarkeit und Erwärmung

Untersuchen der Strombelastbarkeit und Erwärmung elektrischer Betriebsmittel:

Grundlagenforschung

- Wärmequellen und -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 Elektrotechnik
- Dimensionieren der Leiterquerschnitte von Hochstromanlagen
- Optimieren der Anordnung von Leitern z. B. in Armaturen
- Rechnerischer Nachweis der Erwärmung von Energieverteileranlagen
- Koppeln der Methoden und Werkzeuge zum Berechnen der Wärmeübertragung und Optimieren von Wärmeflüssen

Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Elektrische Kontakte und Verbindungen“



Lukas Büttner, Dipl.-Ing.

Entwicklung eines Ganzbereichs-Sicherungseinsatzes mit erhöhter Zuverlässigkeit für den Einsatz im Energieversorgungsnetz der Zukunft

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Förderkennzeichen: ZF4272802LT9

Sicherungen schützen elektrische Anlagen bereits seit Jahrzehnten kostengünstig und effizient vor Fehlerströmen. In Photovoltaik (PV)-Anlagen treten im Fehlerfall teilweise deutlich geringere Fehlerströme auf, als dies bei anderen Anwendungen wie Sicherungen für den Kabelschutz der Fall ist. Nichts desto trotz, können dies erhebliche Schäden an PV-Modulen hervorrufen. Höhere Anforderungen an das Betriebs- und Schaltverhalten für NH-Sicherungen wurden dadurch erforderlich. Schwankende Sonneneinstrahlung und Umgebungsbedingungen führen zusätzlich zu starken thermischen Wechselbelastungen der Schmelzleiter.

Das Vorgehen, um die Schmelzleiter an die neuen Anforderungen anzupassen wird im folgenden erläutert (Bild 1). Dafür wurden Schmelzleiter mit der finiten-Elemente-Methode (FEM) thermisch ausgelegt und anschließend vom Projektpartner gefertigt. Die Auslegung der Schmelzleiter erfolgte in direkter Rückkopplung mit der Auswertung, wodurch insgesamt drei Iterationen unterschiedlichster Geometrien untersucht werden konnten. Parallel dazu wurden die Schmelzleiter in Langzeitversuchen definiert vorgealtert, um eine Alterung unter möglichst vielen verschiedenen Betriebsbedingungen zu simulieren.

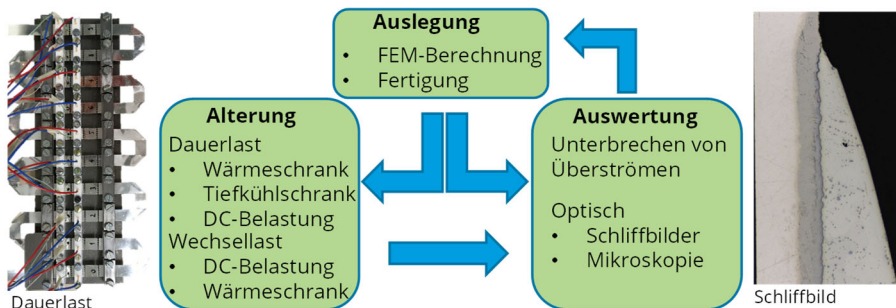


Bild 1: Vorgehensweise im Projekt zum Optimieren von Schmelzsicherungen für PV-Anwendungen

Bei Belastung der Sicherungen mit Überströmen sind die physikalischen Prozesse, die zur Unterbrechung des Stromkreises führen, noch nicht abschließend geklärt. Daher wurden diese bei den Untersuchungen besonders betrachtet. Bei Überströmen, die Temperaturen oberhalb von $\vartheta > 232\text{ °C}$ hervorrufen, diffundiert der Werkstoff des Schmelzleiters in das

Lot bis der Stromfluss unterbrochen wird (Bild 2). Darauf aufbauend wurden verschiedene konstruktive Einflussgrößen des Zinnlots bei Überströmen im Grenzbereich untersucht. Hierfür wurde insbesondere der Einfluss der Temperatur, der Position und des Volumens des Lots auf Schmelzleitern aus Silber betrachtet. Mit Hilfe der FEM-Berechnungen (Bild 3) konnten die konstruktiven Einflüsse direkt mit den physikalischen Prozessen beim Unterbrechen von Überströmen zusammengeführt werden. Dadurch konnte das Unterbrechungsverhalten der unterschiedlichen Schmelzleitertypen bei gleichbleibenden thermischen Randbedingungen untersucht werden.

Bei geeigneter Auslegung, konnte sowohl die Zeit bis zum Unterbrechen des Stromkreises als auch deren Streuung unter Berücksichtigung der erhöhten normativen Anforderungen [1] deutlich reduziert werden [2].

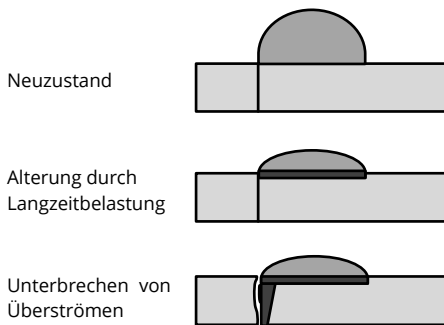


Bild 2: Schnitansicht des Schmelzleiters in den jeweiligen Zuständen

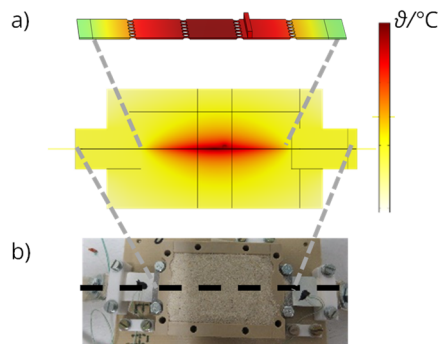


Bild 3: Unterbrechen von Überströmen; a) Aufbau; b) FEM-Berechnung

Die unterschiedlich wirkenden physikalischen Prozesse, wie Interdiffusion, Elektromigration, bzw. mechanische Spannungen innerhalb des Lots durch beispielsweise Wechselbelastung, können durch die Parallelität der verschiedenen Untersuchungen mit und ohne Gleichstrom direkt zueinander abgegrenzt werden.

Mit anschließenden Versuchen zum Unterbrechungsverhalten der definiert vorgealterten Schmelzleiter, wurde der Einfluss der konstruktiven Auslegung des Schmelzleiters auf sein Betriebs- und Langzeitverhalten zuverlässig klassifiziert. Anhand der dadurch entstandenen optimierten Geometrien konnten Kriterien für ein langzeitstabiles Verhalten von Schmelzleitern unter den neuen Anforderungen abgeleitet werden.

[1] 60269-6:2021: Low-voltage fuses: Part 6: Supplementary requirements for fuse-links for the protection of solar photovoltaic energy systems.

[2] Büttner, L.; OBERST, M.; HILDMANN, C.; SCHLEGEL, S.: Influence of geometry, solder position and volume on the fusing time of silver fuse elements with tin solder at low overcurrents in low-voltage power fuses. In: ICEC 31st International Conference on Electrical Contacts. Sapporo, Japan, 2022, S. 98–104



Markus Gödicke, Dipl.-Ing.

**Untersuchungen zum Einfluss von
Werkstoff und Geometrie auf das
elektrische Kontaktverhalten von
Pressverbindungen mit mehrdrähtigen
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 Kontaktverhalten. Dazu wird der Einfluss von Material und Geometrie auf das elektrische und thermische Kontakt- und Langzeitverhalten von Pressverbindungen mit mehrdrähtigen Leitern untersucht. Untersucht wird ein mehrdrähtiger Leiter aus einer bisher nicht in der Kabeltechnik eingesetzten Aluminiumlegierung mit einem Querschnitt von 240 mm². Im ersten Schritt des Projekts wird das Kontaktverhalten von Pressverbindungen mit diesem Leiter für verschiedene Werkstoffe und Geometrien der Verbinderhülse untersucht.

Dazu wurden Pressverbindungen mit vier verschiedenen verfügbaren Aluminiumlegierungen, deren elektrische und mechanische Eigenschaften unterschiedlich sind, hergestellt (Tabelle 1). Die mechanischen Werkstoffeigenschaften werden in Zugversuchen und Härtemessungen untersucht sowie Schlißbilder angefertigt. Dies wird genutzt, um die genauen Eigenschaften der spezifischen Chargen zu ermitteln und die Kennwerte (Tabelle 1) im weiteren Verlauf des Projektes in Modellen zu implementieren.

Tabelle 1: Materialeigenschaften der eingesetzten Verbinder

Material	Zustand	Elektrische Leitfähigkeit in MS/m	Zugfestig- keit in MPa	Streck- grenze in MPa	Wärmeleit- fähigkeit in W/mK	Bruch- dehnung
EN AW-5754	H111	20-23	240	80	140-160	12
EN AW-6060	T66	34-38	215	160	202-220	6
EN AW-6082	T6	24-32	310	260	170-220	10
EN AW-2007	T4	18-22	340	220	130-160	8

Zunächst wurde eine Geometrie der Verbindung sowie ein zugeordnetes Pressverfahren festgelegt und damit definierte Prüflinge gefertigt (Bild 1). Diese ermöglichen es, den Verbindungswiderstand der Pressverbindungen mit der Vier-Punkt-Messmethode reproduzierbar zu messen (Bild 1).

Um das elektrisch-thermische Betriebsverhalten der Pressverbindungen zu untersuchen, werden jeweils sechs Verbindungen mit Presshülsen jedes Materials bei 90 °C in einem Wärmeschrank gelagert und zyklisch der Widerstand gemessen.

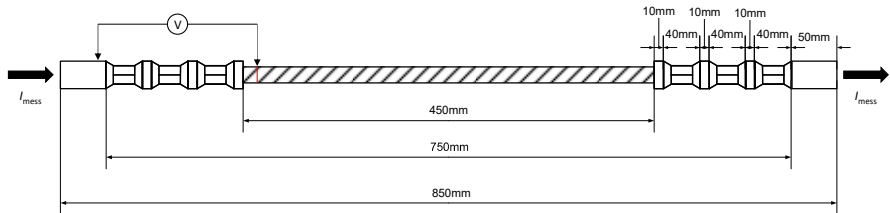


Bild 1: Prüflingsanordnung für den Materialvergleich und Widerstandsmessprinzip nach der Vier-Punkt-Messmethode (schematische Abbildung)

Im ersten Schritt sind die Ausgangswiderstände der unterschiedlichen Verbinderröhrenwerkstoffe gegenüber zu stellen (Bild 2). Der Einfluss der Unterschiede in den elektrischen und mechanischen Eigenschaften zeigt sich bereits deutlich im Ausgangszustand nach der Montage der Verbindung (Bild 2).

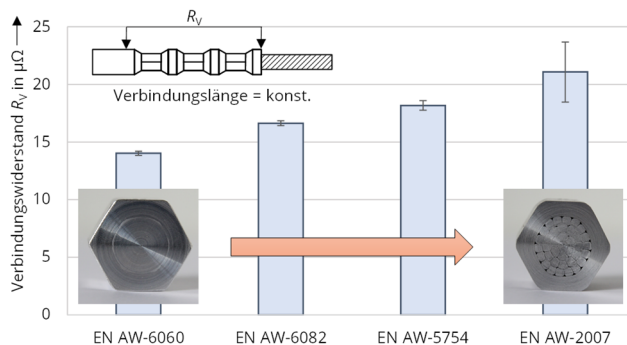


Bild 2: Mittelwert des Verbindungswiderstandes der unterschiedlichen Werkstoffe im Ausgangszustand nach der Verpressung und Abbildung der Querschnitte der Verbindungen zweier Werkstoffe

In den Schnittbildern von EN AW-6060 und EN AW-2007 ist deutlich der Unterschied im Umformverhalten zu erkennen (Bild 2). So wird im Fall von EN AW-6060 der Leiter durch die Pressung stark umgeformt, das im Querschnitt die Leiterstruktur kaum ersichtlich ist. Dies begründet das deutlich bessere elektrische Kontaktverhalten der Verbindungen mit dem Hülsewerkstoff EN AW-6060 im Vergleich zum EN AW-2007. Qualitativ korreliert das Umformverhalten mit dem elektrischen Kontaktverhalten. Entsprechend wird mit EN AW-6060 im weiteren Verlauf des Projekts die Designoptimierung der Verbindung vorgenommen. Die Ergebnisse dieser Versuche zum Kontaktverhalten sind Grundlage für die Planung und Auslegung der Langzeitversuche. In den Langzeitversuchen wird die Temperaturstabilität und das elektrische Verhalten des durch die Kontaktversuche ermittelten Verbindungssystems unter thermischer Belastung betrachtet. Nachdem so ein optimales Design des Verbindungssystems ermittelt wurde, soll dieses einer Normprüfung nach DIN EN IEC 61238-1-3:2022-11 [1] unterzogen werden, um so die Entwicklung abzuschließen.

[1] DIN EN IEC 61238-1-3:2020-11, „Pressverbinder und Schraubenverbinder für Starkstromkabel“, 2020



Christian Hildmann, Dr.-Ing.

Leitprojekt
H₂Giga

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Zuverlässige Verbindungstechnik für die Stromversorgung von Elektrolyseanlagen

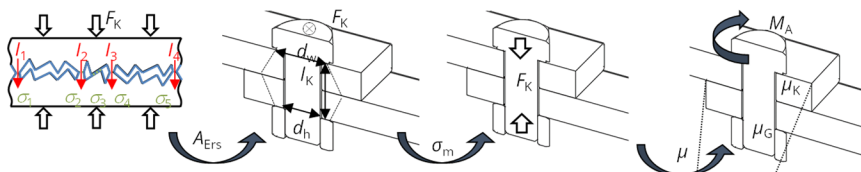
Die Systemtechnik und die Netzintegration von Anlagen für die Erzeugung von grünem Wasserstoff zu erforschen sowie technisch und wirtschaftlich zu optimieren sind die Schwerpunkte des Verbundvorhabens *HyLeiT* als Teil der Technologieplattform Elektrolyse - *H2Giga*. Der Fokus des Verbunds liegt insbesondere auf der Stromrichtertechnik als Bindeglied zwischen Netz und Elektrolyseur. Neben Fragestellungen zur grundlegenden Konzeption dieser elektrischen Anlage unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen der Elektrolyseeinheiten sowie der statischen und dynamischen Netzintegration wird die Auswahl und die Auslegung der Komponenten betrachtet. Das Bereitstellen von Leistungen im MW-Bereich mit Niederspannungs-DC-Systemen mit hohem Wirkungsgrad erfordert entsprechend, dass Ströme im Bereich mehrerer zehn Kiloampere effizient geführt werden müssen. Dies stellt hohe Anforderungen an die Auswahl und Dimensionierung der Leiter sowie die Zuverlässigkeit und die Sicherheit der Verbindungstechnik in solchen Systemen. Entsprechend sind Untersuchungen zum elektrischen Kontakt- und Langzeitverhalten der für die spezifische Anwendung relevanten Werkstoffpaarungen für die stromführenden Verbindungen vorgesehen (Tabelle 1). Betrachtet werden Rechteckleiter mit Aluminium- und Kupfergrundwerkstoffen, deren Kontaktflächen elektrolytisch beschichtet, spritzverkupfert, laserstrukturiert oder unbeschichtet sind.

Tabelle 1: Relevante Grund- und Beschichtungswerkstoffe stromführender Verbindungen sowie jeweils angestrebte Grenzeinsatzbedingungen in der Anwendung

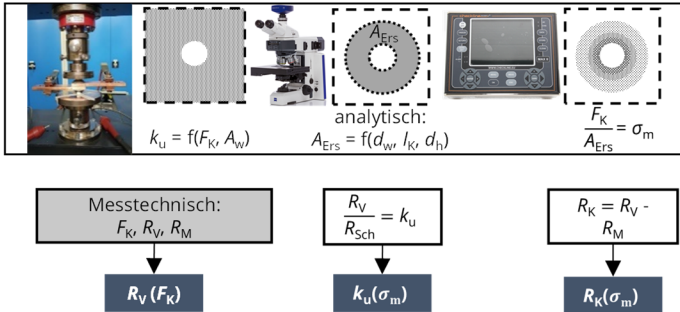
Grundwerkstoff	Zustand Kontaktfläche	Temperatur
E-AlMgSi0,5 (EN AW-6101B-T7)	blank	
	verzinnt	140 °C
	spritzverkupfert	180 °C
Cu-ETP R240	blank oder verzinnt mit	
	Kontaktelement	140 °C
	blank und laserstrukturiert	160 °C
	verzinnt, vernickelt	

Zunächst wird im Projekt das Kontaktverhalten mit einer angepassten Systematik untersucht (Bild 1). Dazu werden die Kontaktkraft-Verbindungswiderstands-Kennlinien $R_K(F_K)$ in Druckversuchen mit flächig gepressten Stromschienen mit einer Materialprüfmaschine aufgenommen. Der jeweilige Materialwiderstand R_M der Verbindungen wird dabei berücksichtigt, um den Kontaktwiderstand R_K zu ermitteln.

Schraubenauslegung



Elektrisches Kontaktverhalten



elektrisch $\longleftrightarrow$ mechanisch materialunabhängig

Bild 1: Methodik für das Bewerten des Kontaktverhaltens einer stromführenden Verbindung

Anschließend werden die Kennlinien zwischen der mittleren mechanischen Spannung und dem Gütefaktor k_u sowie dem Kontaktwiderstand R_K ermittelt. Ziel ist es hierbei, diese Kennlinien mit den Eigenschaften der Oberflächen zu korrelieren. Dazu werden die Topografien der Kontaktflächen mit einem 3D-Mikroskop vor und nach den Druckversuchen ausgewertet, um eine ggf. veränderte Verteilung der Rauigkeit mit analytischen Ansätzen zum Berechnen des mechanischen Kontaktverhaltens abzugleichen und insbesondere Rückschlüsse auf die Streuung im Kontaktverhalten zu ziehen. Die Kennlinien, die das Kontaktverhalten der jeweiligen Materialpaarung charakterisieren, werden anschließend bei der Auslegung der Schraubenverbindungen angewendet (Bild 1) [1]. Dazu werden die Ersatz-Querschnittsflächen A_{ers} der typischen Schraubfälle berechnet und Mindestwerte für die Kontaktkraft anhand der erarbeiteten Kennlinien hergeleitet. Für die praktische Anwendung können bei bekannten Reibwerten im Gewinde sowie an den Auflageflächen der Fügeelemente die erforderlichen Anziehdrehmomente bestimmt werden. Die eingestellten Kontaktkräfte werden über das Messen der Schraubendehnung mit einem Ultraschallmessgerät validiert.

Zukünftig sind Langzeitversuche mit Verbindungen aus den relevanten Materialpaarungen bei den spezifischen Grenzeinsatzbedingungen geplant. Mit diesen soll die Langzeitbeständigkeit der stromführenden Verbindungen insbesondere hinsichtlich der Wirkung chemischer Reaktionen und unter Berücksichtigung des Kraftabbaus nachgewiesen werden.

[1] Kloos, K.-H., Thomala, W.: Schraubenverbindungen - Grundlagen, Berechnung, Eigenschaften, Handhabung. 5. Aufl., Berlin, Heidelberg. 2007. - ISBN 978-3-540-21282-9.



Toni Israel, Dr.-Ing.

Selbstschmierende Beschichtungen für Hochstrom-Steckverbindungen

Supported by:

Federal Ministry
for Economic Affairs
and Climate Actionon the basis of a decision
by the German Bundestag

Für hochstromführende Steck- und Gleitverbindungen, die in der elektrischen Energieversorgung und in der E-Mobilität eingesetzt werden, werden fast ausschließlich Silber oder Silberlegierungen als Beschichtungswerkstoffe eingesetzt. Ziel ist es dabei, einen niedrigen elektrischen Kontaktwiderstand und gleichzeitig einen geringen Reibungsverschleiß zu erreichen. Der Einsatz von Schmierfetten, der bei Steckverbindungen in der elektrischen Energieversorgung üblich ist, ist in der E-Mobilität aufgrund der teils unbekannten Anwendungsbedingungen, der erforderlichen präzisen Dosierung und der Übertragung auf möglicherweise ungeeignete Kontaktpartner nicht verbreitet. Als Alternative dazu kommen Silber-Dispersionsbeschichtungen in Betracht, in die Partikel mit schmierenden Eigenschaften eingebettet sind.

Im Projekt „Kontakt- und Langzeitverhalten selbstschmierender Beschichtungen in stromtragenden Verbindungen der Elektroenergietechnik“ wurden daher selbstschmierende Silberdispersionsbeschichtungen (Ag-C, Ag-WS₂, Ag-MoS₂) mit geschmierten und ungeschmierten Silberschichten hinsichtlich des elektrischen, tribologischen und thermischen Verhaltens verglichen. Die verschiedenen Schichten wurden bereits in Vorversuchen an Modellgeometrien elektrisch und mechanisch bewertet. Anschließend Versuche an industriellen Probekörpern dienten dazu, die verschiedenen selbstschmierenden Schichten für den Einsatz zu qualifizieren. Es wurden Erwärmungstests sowie insbesondere Reibverschleißversuche mit und ohne Strombelastung durchgeführt. Dazu wurde unter anderem ein Versuchsstand für das Prüfen von Verbindungen der Elektroenergietechnik verwendet (Bild 1).

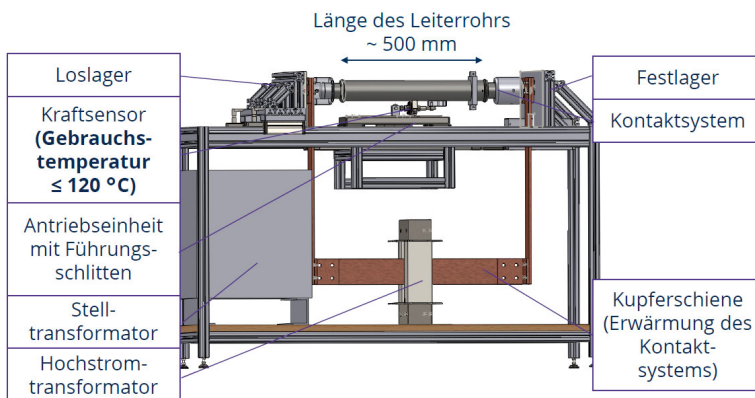


Bild 1: Versuchsaufbau für die Gleitzyklenversuche

Eine Silberdispersionsbeschichtung mit eingebetteten Graphitpartikeln kann bei Raumtemperatur die Anzahl an Reibzyklen bis zum Ausfall einer Verbindung um den Faktor 10...18 gegenüber einer Verbindung mit silberbeschichteten Kontakten erhöhen (Bild 2). Bei einer Temperatur von 55 °C verringert sich der Wert auf den Faktor 1,4. Molybdändisulfid-Partikel in der Silbermatrix erhöhen die Anzahl an Zyklen bis zum Ausfall um den Faktor 5...10 bei Raumtemperatur.

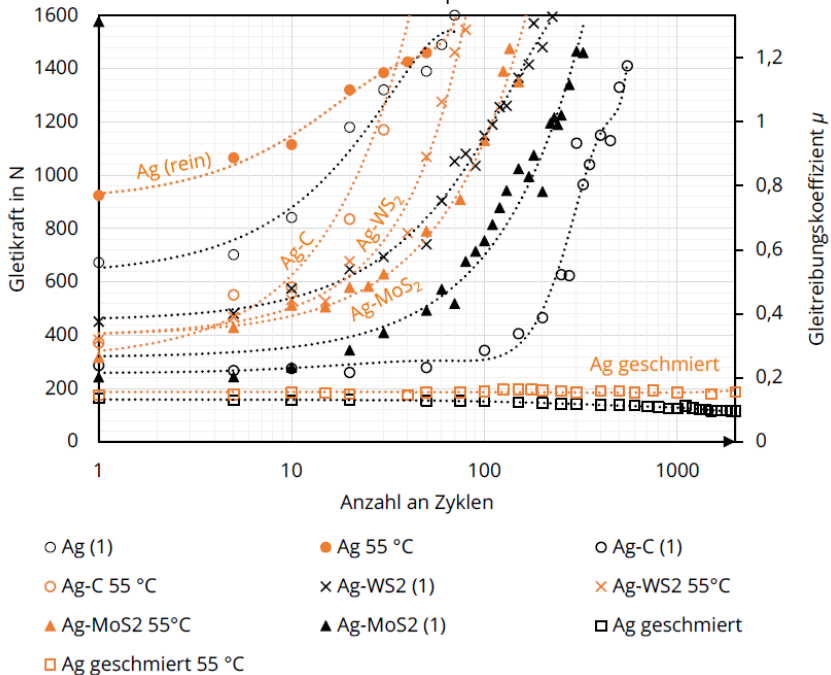


Bild 2: Gleitkraft und Gleitreibungskoeffizient abhängig von der Anzahl der Zyklen (Weg je Zyklus: 120 mm) [1]

Das Verwenden von eingebetteten Wolframsdisulfid-Partikeln in einer Silbermatrix erhöht die Anzahl an Zyklen um den Faktor 3...6. Ag-Ws2 und Ag-MoS2 erreichen diese Verbesserung im tribologischen Verhalten im Gegensatz zu Ag-C auch bei erhöhten Temperaturen. Darüberhinaus sind der Kontaktwiderstand und die Strombelastbarkeit der Steckverbindungen mit Ag-C gleichwertig mit denen, die eine reine Silberbeschichtung hat. Ag-Ws2 und Ag-MoS2 haben etwas höhere Kontaktwiderstände und damit eine etwas geringere Dauerstrombelastbarkeit. Allerdings erreichen die Verbindungen mit Dispersionschichten und den untersuchten Partikeltypen noch nicht die tribologischen Eigenschaften einer mit Schmierfett ausgeführten Steckverbindung. Dies ist ein Ausgangspunkt für die weitere Optimierung der Eigenschaften in zukünftigen Projekten.

[1] Israel, T.; Oberst, M.; Hildmann, C.; Schlegel, S.: Selbstschmierende Beschichtungen für Hochstrom-Steckverbindungen. 26. Albert-Keil Kontaktseminar, Karlsruhe, 2022. - ISBN ISBN 978-3-8007-5781-7



Jörg Kiefer, M. Sc.
Elektrisches Kontaktverhalten
umformtechnischer Fügeverbindungen
bei Fehlerströmen am Beispiel von
Clinchverbindungen



Clinchverbindungen ersetzen immer häufiger konventionelle Verbindungen wie das Punktschweißen oder das Stanznieten, z. B. zum Verbinden von Blechen im Automobilbereich. Dabei besteht der Vorteil dieser Fügeverbindung darin, energieeffizient, materialsparend und mit einem hohen Automatisierungsgrad Verbindungen herzustellen. Zusätzliche Fügeelemente werden nicht benötigt. Die Fügepartner werden durch ein Werkzeug ineinander umgeformt, dass sich eine kraft- und formschlüssige Verbindung einstellt (Bild 1).

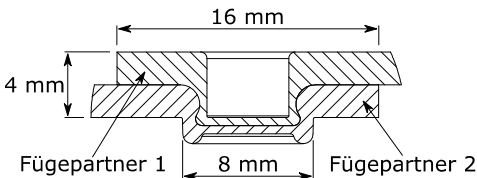


Bild 1: Schnittzeichnung einer Clinchverbindung

Die rein mechanische Funktion dieser Verbindung (z. B. im Karosseriebau) wird ergänzt um die elektrische Funktion des Stromleitens. Clinchverbindungen müssen insbesondere unter den Anforderungen der Elektromobilität sicher und zuverlässig funktionieren. In der Vergangenheit wurden daher Untersuchungen mit Dauerlasten und Wechsellasten an

Clinchverbindungen durchgeführt [1]. Das Verhalten der Verbindungen bei Belastung mit hohen Kurzzeitströmen, wie sie im Fehlerfall auftreten können, ist wenig erforscht. Die Fehlerströme können ein Vielfaches der Nennströme betragen (Bild 2).

Da Fehler zu jedem Zeitpunkt während der Betriebsdauer eines Fahrzeugs auftreten können, werden Untersuchungen mit Fehlerströmen zu Beginn der Lebensdauer und nach einer Voralterung von 2000 h durchgeführt. Durch die Verwendung unterschiedlicher Grund- und Beschichtungswerkstoffe werden bei der Alterung unterschiedliche Temperaturen berücksichtigt [1]. Für

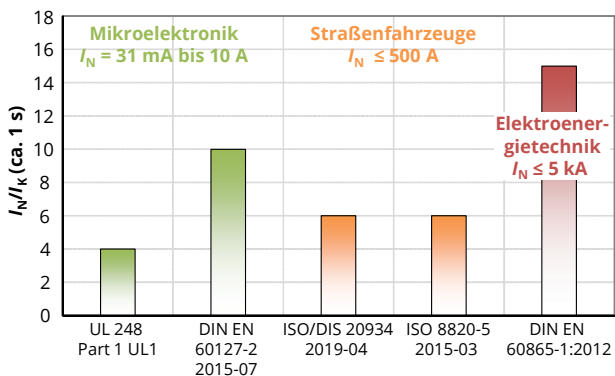
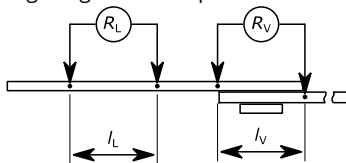


Bild 2: Fehlerströme ausgewählter Bereiche der Elektrotechnik

Kupfer-Kupfer-Verbindungen werden 120 °C bzw. 150 °C angesetzt. Verbindungen, bei denen ein oder beide Fügepartner aus Aluminium bestehen, wird bei einer Temperatur von 100 °C gealtert. Anschließend werden mit neuen und den vorgealterten Verbindungen Kurzzeitstromversuche durchgeführt. Dazu werden die Proben im Versuchsstand befestigt und anschließend einem fünfmaligen Kurzzeitstrom unterzogen. Der Strom ist so gewählt, dass die Proben in einer Sekunde die Grenztemperaturen von 170 °C für Verbindungen mit Leitern aus Kupfer und von 200 °C für Verbindungen mit Leitern aus Aluminium erreichen [2]. Zwischen den Belastungen wird der Verbindungswiderstand R_V bei Raumtemperatur gemessen (Bild 3) und damit der Gütefaktor (1) bestimmt. Bei einem Gütefaktor $k_u = 1$ ist die Verbindung eine Kaltstelle. Ab dem Grenzgütefaktor von $k_{uT} = 1,17$ erreicht eine Clinchverbindung die gleiche Temperatur wie der homogene Leiter.



$$k_u = \frac{R_V}{R_L} \quad (1)$$

Bild 3: Gütefaktor

Im Folgenden werden exemplarisch die Ergebnisse zweier Versuchsreihen gezeigt, diese sind mit einem Doppelclinchpunkt gefügt (Bild 4). In der ersten Versuchsreihe wurden die Clinchverbindungen mit unbeschichteten Kupferoberflächen gefügt. Bei der zweiten Versuchsreihe sind die Verbindungen mit galvanisch verzinneten Kupferblechen hergestellt.

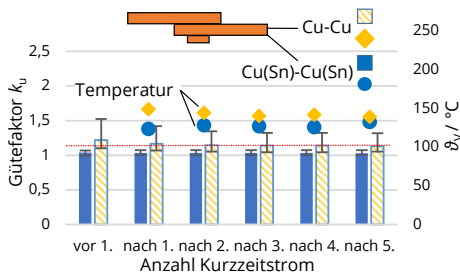


Bild 4: Vergleich Clinchverbindung mit verschiedenen Oberflächen Untersuchung im Neuzustand

Durch den hohen Umformungsgrad beim Clinchen bilden sich zwischen den verzinneten Kontaktpartnern großflächige Mikrokontakte aus. Der Gütefaktor ist geringer als bei Verbindungen mit Kontaktpartnern aus blankem Kupfer und streut weniger (Bild 4). Bei diesen Verbindungen kommt es nach der ersten Belastung mit Kurzzeitstrom zu einem Erweichen des Werkstoffs in der Verbindung. Die sich berührenden Oberflächen werden größer, es bilden sich größere Punktkontakte aus und es stellt sich stabil ein geringer Gütefaktor ein.

Ein Temperatureinfluss durch die Kurzzeitstromversuche ist bei verzinneten Proben ebenfalls nicht erkennbar. Die erreichten Temperaturen der verzinneten Proben liegen unter denen mit unbeschichteter Oberfläche.

- [1] U. Füssel, S. Großmann, J. Kalich, S. Schlegel, A. Ramonat, „Optimierung umformtechnischer Fügeverfahren zur Kontaktierung elektrischer Leiter“, Schlussbericht, Technische Universität Dresden 2018
- [2] Aluminium-Zentrale e.V., „Aluminium in der Elektrotechnik und Elektronik“, Merkblatt



Michelle Pomsel, Dipl.-Ing.

Verhalten von Hochstromsteckverbindungen bei kurzzeitiger Strombelastung unter Berücksichtigung des Freiheitsgrades der Prüfbedingungen

Der erforderliche Ausbau des Energieversorgungsnetzes sowie der vermehrte Einsatz von erneuerbaren Energiequellen und der E-Mobilität stellen neue Anforderungen an elektrische Betriebsmittel hinsichtlich ihrer Belastung. Steckverbindungen für Hochstromanwendungen müssen steigende Bemessungs- und Kurzschlussströme tragen und über Jahre hinweg sicher und zuverlässig funktionieren. Im Fehlerfall kann es kurzzeitig zu sehr hohen Fehlerströmen mit mehreren zehn Kiloampere Spitzenwert kommen. Diese können für die Kontaktelemente einer Steckverbindung aufgrund ihrer kleinen Querschnittsfläche besonders kritisch sein und zu einer Schädigung führen. Deshalb wird die Fehlerstromfestigkeit der in Hochstromsteckverbindungen eingesetzten Kontaktelemente geprüft. Dabei wird auch der Einfluss des Freiheitsgrades in normativen Prüfbedingungen auf das Kurzschlussverhalten untersucht und Grenzwerte für eine maximale Belastung definiert.

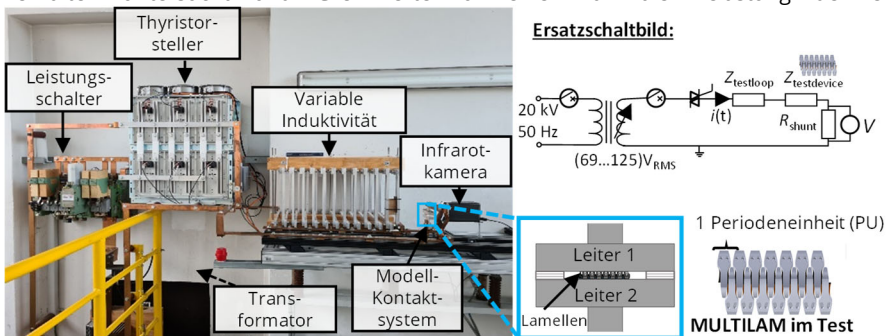


Bild 1: Versuchsstand für kurzzeitige Belastungen für eine Kurzschlussdauer von 300 ms

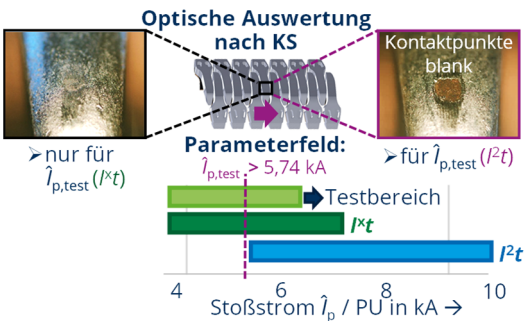
Das Prüfen der Fehlerstromfestigkeit von Steckverbindungen erfolgt nach standardisierten Verfahren mit festgelegten Prüfparametern. In Typprüfungen, z. B. gemäß IEC 62271-1, sind aufgrund von Limitierungen der Versuchstechnik von den Bemessungsparametern abweichende Kurzschlussstromstärken und -dauern zulässig. Dementsprechend ist beispielsweise eine getrennte Prüfung mit Stoß- und Kurzschlussstrom zulässig und es kann die Kurzschlussdauer in bestimmten Strombereichen entsprechend des Pt -Kriteriums variiert werden. Da vorherige Untersuchungen jedoch gezeigt haben, dass das Festlegen der Prüfparameter anhand des Pt -Kriteriums für elektrische Kontakte zu deren unzulässiger Überbelastung führen kann, wird das in [1] vorgeschlagene Pt -Kriterium herangezogen. Mit beiden Kriterien ergibt sich jeweils ein zulässiger Bereich, mit welchem gemäß IEC 62271-1 geprüft werden darf. Die Wirkung des Stoßstroms innerhalb dieses zulässigen Bereichs auf

den elektrischen Kontakt wird untersucht [2]. Der Kurzschlussstrom kann zu einer thermisch aktivierten Schädigung der Verbindung und damit zum unzulässigen Erhöhen des Verbindungswiderstands führen (Tab. 1). Durch Spannungsrelaxation kann sich die Kontaktkraft nach dem Kurzschluss verringern. Des Weiteren kann es zum Verschweißen der Mikrokontakte und Blasenbildung der Beschichtung durch deren Abheben kommen.

Tabelle 1: Auswertungskriterien für Kurzschlussprüfungen

IEC 62271-1	Zusätzliche Ausschlusskriterien nach Hersteller internen Anforderungen
elektrisch	
Widerstandszunahme während des Kurzschlusses um mehr als 20 %	$R_{PU} \geq 208 \mu\Omega$ (Maximaler Verbindungswiderstand)
optisch	
- Blasen im Silber / blanke Kontakte - Verschweißen der Kontakte	Kontaktkraft $F_K \leq 2,0 \text{ N / PU}$ (definierte Mindestkraft nach Schädigung)
mechanisch	

Weder das elektrische noch das mechanische Kontaktverhalten hat sich bei den untersuchten Kontaktelementen durch die Kurzschlussbelastung verschlechtert. Dabei bestimmt die Höhe des Stoßstromes zu Beginn des Kurzschlusses maßgeblich die maximale Erwärmung im Kontakt. Die hohe Temperatur während des Kurzschlusses hat die lokale Reduktion der Kontakthärte der Silberbeschichtung zur Folge, was dazu führt, dass sich die Kontaktfläche vergrößert und der Widerstand reduziert. Einzig allein das optische Ausschlusskriterium



nach IEC 62271-1 wurde bei den geprüften Spezifikationen teils überschritten, indem die Beschichtung durch ein Verschweißen der Kontakte nach dem Öffnen der Verbindung aufgerissen wird. Das Verschweißen verbessert kurzzeitig das elektrische Kontaktverhalten. In der Folge kann aber ein Oxidieren des blanken Kupfers langfristig den Kontaktwiderstand erhöhen.

Bild 2: Durch Versuche spezifizierter Grenzstoßstrom, ab dem blanke Kontaktpunkte aufgetreten sind

Der Stoßstrom für das Kontaktelement wurde in den Kurzschlussprüfungen bis zu 5,74 kA / PU spezifiziert. Da alle mittels I^2t -Kriterium berechneten Stoßströme oberhalb des spezifizierten Wertes liegen, können diese zu einer Überlastung des Kontaktsystems führen.

[1] T. Israel, „Verhalten von Hochstrom-Steckverbindungen mit Kontaktelementen bei kurzer Strombelastung“, TU Dresden, Dresden, 2020. [Online]. Verfügbar unter: 978-3-86780-653-4

[2] Michelle Pomsel, Toni Israel, Christian Hildmann, Stephan Schlegel, und Tom Kufner, „Influence of the Degree of Freedom in Normative Test Conditions on the Short-Circuit Behavior of Power Plug-In Connectors“, gehalten auf der 67th IEEE Holm Conference, 2022.



Franck Stephane Djuimeni Poudeu,
Dipl.-Ing.

**Einfluss der Leiter- und
Beschichtungswerkstoffe auf die
Reibung in stromführenden
Schraubenverbindungen**

Projekt gefördert durch:
Daimler AG
(Industriepromotion)

Neben der Geometrie der Verbindung, dem Leiter- und Beschichtungswerkstoff und der Umweltbelastungen ist das Langzeitverhalten von stromführenden Schraubenverbindungen stark von den Montageparametern wie Reibwerte und Setzen abhängig. Insbesondere die Reibung bestimmt direkt nach der Montage die Vorspannkraft, die in die Schraubenverbindung tatsächlich eingeleitet wird. Die Reibung ist insbesondere von dem Werkstoff und der Oberflächenbeschaffenheit (Härte, Rauheit, ...) der Reibpaarungen sowie dem Oxidationszustand und der Luftfeuchtigkeit abhängig [1], [2]. Aktuell liegen kaum Angaben zu Reibwerten zwischen Schraubenunterkopf und Leiter (Unterkopfreibwerte) abhängig von Kontaktwerkstoffen vor. In der VDI 2230-1 sind einige Reibwerte für Stahl-Stahl-Paarungen angegeben. Jedoch werden diese aktuell auch zur Auslegung von Schraubenverbindungen mit Leitern aus Kupfer und Aluminium verwendet. Damit ergibt sich das Risiko, dass die tatsächliche Montagevorspannkraft falsch angenommen wird und die Schraubenverbindungen damit unter- oder überbelastet werden. In diesem Beitrag werden die Unterkopfreibwerte abhängig von den Leiter- und Beschichtungswerkstoffen sowie von der Montagevorspannkraft bestimmt. Verzinnte und versilberte Aluminium- und Kupferleiter sowie blanke Kupferleiter wurden betrachtet. Die verwendeten Fügeelemente waren eine außentragende Sechskantflanschschraube M6 nach MBN 10105 und eine Referenzmutter nach DIN EN ISO 4032. Die Schraubenverbindungen wurden angezogen, sodass die Montagevorspannkraft im Bereich von $(5 \pm 0,5)$ kN bzw. $(7 \pm 0,5)$ kN lagen.

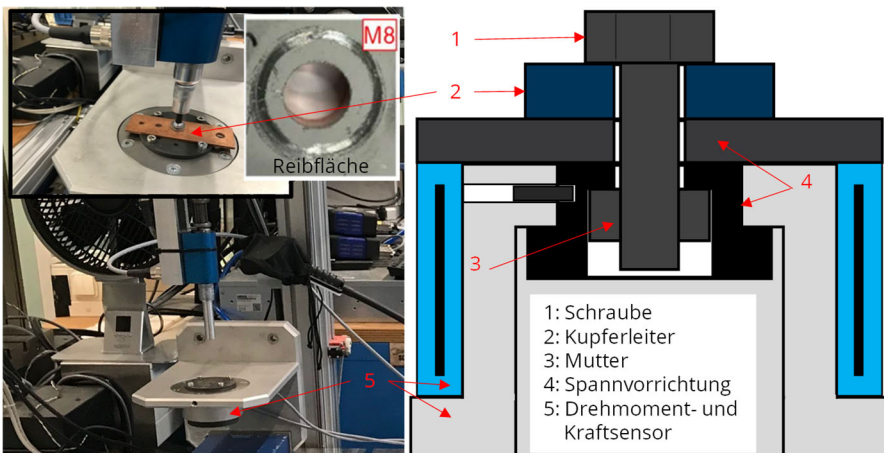


Bild 1: Versuchsaufbau nach [1]

Zum Bestimmen der Reibwerte wurde ein EC-Schrauber verwendet, mit dem das Anzugsmoment M_A eingeleitet wurde. In einem Reibwertprüfstand wurde kontinuierlich das Gewindemoment M_G und die Montagevorspannkraft F_M während der Verschraubung ermittelt (Bild 1). Nach DIN EN ISO 16047 und VDI 2230-1 wurde entsprechend den Gln. (1) und (2) der Gewinde- und der Unterkopfreibwert berechnet (Bild 2).

$$\mu_G = \frac{\frac{M_G}{F_M} - 0,16 \cdot P}{0,58 \cdot d_2} \quad (1)$$

$$\mu_K = \frac{M_K \cdot 2}{F_M \cdot D_{km}} \quad (2)$$

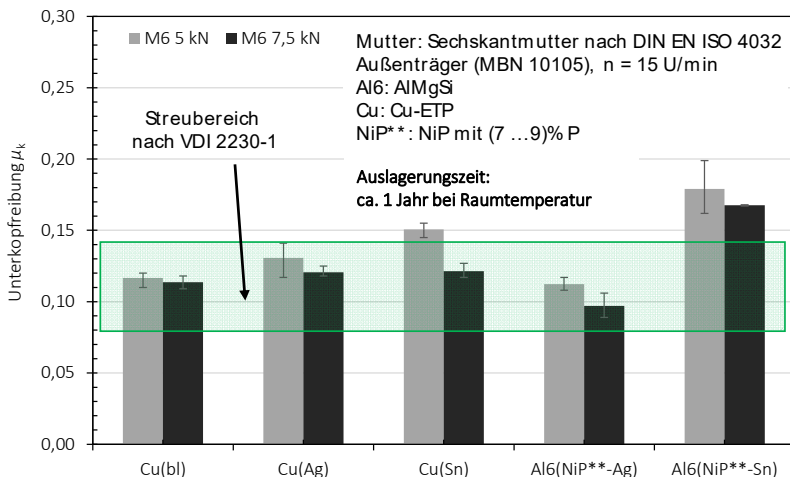


Bild 2: Unterkopfreibwerte von blanken und beschichteten Leitern aus Aluminium und Kupfer

Die Unterkopfreibwerte auf verzinnnten Leitern waren zum Teil weit außerhalb des angenommenen Reibungszahlfernsters (0,08...0,14) der VDI 2230-1. Die Reibwerte auf vezinnten Leitern sind im Schnitt höher als die auf versilberten. Da Zinn sehr weich ist, entsteht beim Reiben eine größere Reibfläche und damit ein größerer Reibwiderstand. Bei größeren Montagevorspannkraften sind die Reibwerte etwas geringer als bei kleinen. Es ist zu prüfen, ob die Schraubengröße und die Schraubenunterkopfgeometrie die Unterkopfreibwerte beeinflussen. Mit diesen Erkenntnissen können anhängig von den Reibpaarungen Grenzbereiche für die Unterkopfreibwerte bei stromführenden Schraubenverbindungen mit beschichteten Leitern bestimmt und die Montagevorspannkraft dadurch besser angenommen werden.

- [1] K.-H. Kloos und W. Thomala, Schraubenverbindungen: Grundlagen, Berechnung, Eigenschaften, Handhabung, 5. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- [2] Chowdhury M. A., et al: The Effect of Relative Humidity and Roughness on the Friction Coefficient under Horizontal Vibration, The Open Mechanical Engineering Journal, 2008, p. 128-135.

Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Hochspannungstechnik“



Andreas Dowbysch, M.Sc.

HVcom² - Beitrag zur Standardisierung von Hochspannungsprüfungen mit zusammengesetzten und kombinierten Spannungen



Förderkennzeichen: 19NRM07

Die Klimaschutzziele der Bundesregierung und die damit verbundene Dekarbonisierung der elektrischen Energieversorgung erfordern die Erneuerung und den Ausbau des elektrischen Energieversorgungsnetzes [1]. Für die Verbindung großer Distanzen und die Übertragung hoher elektrischer Leistungen zeigt sich die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) gegenüber der konventionellen Drehstromübertragung vorteilhaft. Dabei darf der Einsatz von HGÜ-Systemen die hohe Versorgungssicherheit mit elektrischer Energie nicht gefährden. Zur Sicherstellung eines fehlerfreien Betriebs der Anlagen über die geplante Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten werden die einzelnen Betriebsmittel dielektrischen und mechanischen Prüfungen unterzogen [2]. Für HGÜ-Komponenten ist unter anderem die Prüfung mit sogenannten zusammengesetzten Spannungen Stand der Technik. Diese werden durch die Überlagerung von Gleich- und Stoßspannung erzeugt. Dabei stellt die gleichzeitige Messung von verschiedenen Spannungsanteilen eine Herausforderung für das Messequipment dar. So sind herkömmliche kapazitive und ohmsche Spannungsteiler aufgrund ihrer Bauart nicht in der Lage alle Spannungsponenten zusammengesetzter Spannungen zu übertragen. Daher werden zur Messung zusammengesetzter Spannungen ohmsch-kapazitive oder gedämpfte ohmsch-kapazitive Spannungsteiler genutzt. [3]

Spannungsteiler werden entsprechend DIN EN 60060-2 jeweils einzeln für die Messung von Gleich-, Wechsel- oder auch Stoßspannungen kalibriert. Um die Anforderungen der Norm zu erfüllen, können sich dabei für die verschiedenen Spannungsarten unterschiedliche Maßstabsfaktoren ergeben. Die Kalibrierung eines Spannungsteilers für die Messung von zusammengesetzten Spannungen ist zum jetzigen Zeitpunkt in der Norm nicht vorgeschrieben. Die separate Kalibrierung für verschiedene Spannungsarten gewährleistet jedoch nicht, dass die Messsysteme die Fähigkeit besitzen, zusammengesetzte Spannungen korrekt zu messen. An dieser Stelle setzt das Projekt „HVcom² - Support for standardisation of high voltage testing with composite and combined wave shapes“ an. Ziel des Projekts ist es einen Beitrag zur Normung für die Kalibrierung und Prüfung mit zusammengesetzten und kombinierten Spannungen zu leisten. Unter anderem soll die Rückführbarkeit von entsprechend geeigneten Spannungsteilern auf nationale Normale gewährleistet werden. Hierfür werden neue Messsysteme, bestehend aus Software, Rekordern und Spannungsteilern, sowie die entsprechenden Kalibrierdienste von Messsystemen zur Messung zusammengesetzter Spannungen entwickelt. Außerdem werden Methoden, Richtlinien und Empfehlungen für die zuverlässige Bestimmung von Unsicherheiten verfügbarer Messsysteme und ihrer Kalibrierung erarbeitet. Ein zusätzlicher Fokus liegt auf der Bestimmung der gegenseitigen

Einflüsse von Wechsel-, Gleich- und Stoßspannungen bei der Erzeugung und insbesondere Messung zusammengesetzter Spannungen. [3]

Ein Teil des Projekts umfasst eine Messkampagne an den Technischen Universitäten Graz (TUG) und Dresden (TUD) (Bild 1). Ziel der Messkampagne ist es kommerziell erhältliche Messsysteme für die Messung zusammengesetzter Spannungen zu qualifizieren. Hierfür werden diese mit einem im Projekt HVcom² entwickelten Referenzmesssystem mit unterschiedlichen Spannungen belastet und die entsprechenden Unsicherheiten der Zeit- und Amplitudenparameter bestimmt. Die erste Auswertung der Messdaten zeigt, dass alle Messsysteme für die Messung zusammengesetzter Spannungen geeignet sind. Im nächsten Schritt werden die Daten hinsichtlich eines möglichen Einflusses des Prüflabors und somit des Versuchsaufbaus untersucht. Eine Publikation der Ergebnisse ist auf dem „International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)“ in Glasgow im Jahr 2023 vorgesehen.



(Foto: TU Graz, O. Pischler)



(Foto: TU Dresden, H.-P. Pampel)

Bild 1: Spannungsteiler in der Messkampagne an den Technischen Universitäten Graz (links) und Dresden (rechts). In grün der Referenzteiler aus dem Projekt HVcom².

Weitere Informationen: <https://www.ptb.de/empir2020/hv-com2/home/>

Danksagung: Parts of the presented work are used in the project 19NRM07 (HV-com²) which has received funding from the EMPIR programme co-financed by the Participating States and from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme.

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). „Klimaschutzplan 2050“, Druck- und Verlagshaus Zarbock, Berlin, Deutschland, 2019.
- [2] A. Krontiris, A. Nishioka, „Recent HVDC projects – interconnection of countries, off-shore wind connection and Back-to-Back systems.“ CIGRE-IEC Conference on EHV and UHV (AC & DC), Hakodate, Japan, 2019.
- [3] J. Meisner, E. Gockenbach et al., „Support for standardisation of high voltage testing with composite and combined wave shapes.“ Berlin: VDE Verlag, 2022.



Lena Elspaß, Dipl.-Ing.

Ermittlung geeigneter Messtechnik zur Detektion thermomechanischer Alterung in dynamisch betriebenen rotierenden Hochspannungsmaschinen



Rotierende Hochspannungsmaschinen finden als Generatoren und Motoren Anwendung in der Energieversorgung und der Antriebstechnik. Eine gängige Fertigungsmethode des Isoliersystems ist das Imprägnieren des gesamten Stators mittels Ganztränktechnik (engl.: global vacuum pressure impregnation – GVPI) [1]. Dies bietet den Vorteil hoher mechanischer Stabilität und guter Wärmeleitfähigkeit. Herausforderungen birgt die aus der Imprägnierung resultierende mechanische Verklebung der Kupferleiter mit der Isolierung und der Nut bei zyklischem Betrieb der Maschine insbesondere mit zunehmender Aktivteillänge [1].

Im Betrieb führen Stromwärmeverluste zu einer Erwärmung der Kupferleiter, wodurch diese sich ausdehnen. Insbesondere bei einem schnellen Anlauf kann von einem nahezu adiabaten Prozess ausgegangen werden, bei dem sich in erster Linie das Kupfer der Spulen erwärmt, wohingegen die Erwärmung der umliegenden Komponenten näherungsweise vernachlässigt werden kann. Da die einzelnen Materialien verschiedene Wärmeausdehnungskoeffizienten haben, ändert sich ihre Länge unterschiedlich stark. Durch den GVPI-Prozess sind die Komponenten mechanisch fest miteinander verbunden. Die Folge sind thermomechanische Spannungen im Isoliersystem. Diese können Delaminationen innerhalb des Isoliersystems oder den Abriss dessen am Nutaustritt herbeiführen. Ziel des Forschungsvorhabens ist die Ermittlung geeigneter Mess- und Diagnosetechnik, um die Folgen der thermomechanischen Alterung zu erkennen und so geeignete Optimierungsansätze zur Vermeidung und Reduktion thermomechanischer Alterung identifizieren zu können.

Die für die Untersuchung verwendeten Prüflinge S1-S5 bestehen aus einem massiven Innenleiter, auf den das vollständige Isoliersystem einer rotierenden Hochspannungsmaschine appliziert ist (Bild 1). Die isolierten Prüflinge werden in Nutnachbildungen platziert und gemeinsam mit diesen getränkt, um die mechanische Bindung einer realen Maschine nachzustellen. Elektrische Feldsteuerung und hinreichend Überstand von Leiter und Isoliersystem gegenüber der Nutnachbildung ermöglichen Hochspannungsmessungen bis zur 1,2-fachen Nennspannung.

Die im Betrieb auftretenden thermomechanischen Belastungen werden mit einer Zug-Druck-Maschine nachgestellt. Dabei wird eine Kraft auf den Innenleiter ausgeübt, wobei die Nutnachbildung festgehalten wird. Die resultierende Relativbewegung s zwischen Leiter und Nutnachbildung beansprucht das Isoliersystem als Schubspannung. Die Relativbewegung zwischen Leiter und Nutnachbildung wird stufenweise bis zum mechanischen Abriss erhöht. Zwischen den mechanischen Belastungsstufen werden elektrische Diagnosemessungen durchgeführt, um mögliche Schäden infolge der mechanischen Belastung zu detektieren (Bild 2). Als Diagnoseverfahren wird unter anderem die Teilentladungsmessung nach DIN EN 60270 und die scheinbare Ladung Q als Auswertungskriterium genutzt.

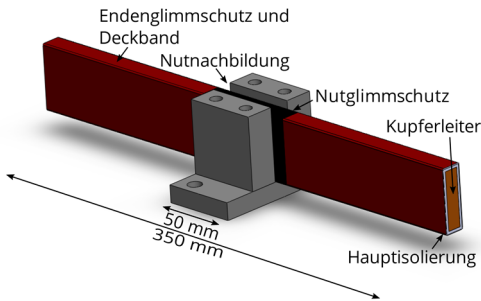


Bild 1: Prüflingsaufbau

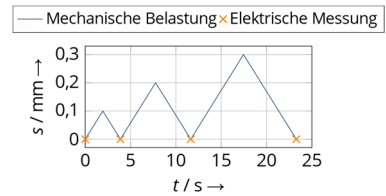
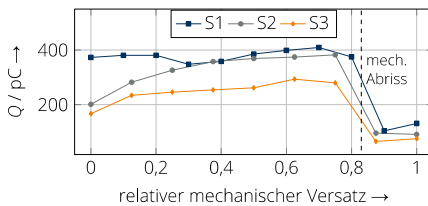
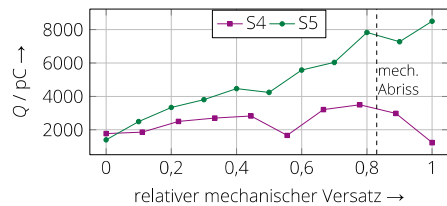


Bild 2: Belastungsprofil und Prüfpunkte

Während der Untersuchung wird zwischen Prüflingen mit einer niedrigen initialen scheinbaren Ladung Q und solchen mit einer hohen initialen scheinbaren Ladung, die ein Indiz auf Vorschädigung ist, unterschieden (Bild 3). Für eine bessere Vergleichbarkeit ist die mittlere scheinbare Ladung bezogen auf den relativen mechanischen Versatz dargestellt.



(a) Prüflinge mit niedriger initialer Ladung



(b) Prüflinge mit hoher initialer Ladung

Bild 3: Entwicklung der mittleren scheinbaren Ladung Q nach mechanischer Belastung

Dabei wird ein signifikant unterschiedliches Verhalten der Prüflinge abhängig von der initialen scheinbaren Ladung deutlich. Bei den Prüflingen mit niedriger initialer Ladung ist eine leichte Zunahme der Ladung vor Abriss erkennbar. Bei Abriss tritt eine deutliche Reduktion dieser ein, was eine sichere Detektion des Abrisses ermöglicht. Die Prüflinge mit hoher initialer Ladung zeigen eine starke Zunahme der Ladung mit erhöhter Belastung. Das spricht für eine Intensivierung bereits vorhandener Fehlstellen. Der mechanische Abriss führt in diesem Fall zu keiner signifikanten Reduktion der Ladung. Unabhängig von den initialen Ladungswerten ist somit eine Veränderung des Entladungsverhaltens bereits vor Abriss erkennbar. Im nächsten Schritt wird der Einfluss realitätsnaher zyklischer Belastung bei festem Versatz auf den Schadensmechanismus untersucht. Weiterhin gilt es die Ergebnisse anhand thermisch herbeigeführter mechanischer Spannungen zu verifizieren.

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



Johanna Linke, Dipl.-Ing.

**Gasisolierte Systeme mit alternativen
Isoliergasen unter
Wechselspannungsbelastung**



**Teilentladungsverhalten
einer Störstelle auf Erdpotential**

In elektrischen Energieanlagen wird seit rund 60 Jahren Schwefelhexafluorid (SF_6) als Schalt- und Isoliergas eingesetzt. Die Vorteile des Gases sind eine hohe elektrische Festigkeit von rund $89 \text{ kV mm}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$ sowie eine hohe Lebensdauer, gute Schalteigenschaften und eine gute Recyclingfähigkeit. Allerdings ist SF_6 das stärkste bekannte, klimawirksame Gas. Es weist ein Treibhauspotential von 25.200 auf [1]. Daher gibt es große Bestrebungen der Industrie, SF_6 zeitnah zu ersetzen, um eine bessere Ökobilanz der Schaltanlagen zu erzielen. Eine mögliche Alternative zu SF_6 ist die Nutzung eines Gasgemisches aus Fluornitril $\text{C}_4\text{-FN}$ in Verbindung mit verschiedenen Hintergrundgasen wie CO_2 , O_2 oder N_2 . Das alternative Gasgemisch weist in Abhängigkeit des Mischungsverhältnisses vergleichbare Isoliereigenschaften auf wie SF_6 . Im Rahmen des Forschungsprojektes wird der Einfluss der Gas Mischung auf die dielektrischen Parameter untersucht, um den Einfluss der einzelnen Komponenten auf das Entladungsverhalten genauer beschreiben und quantifizieren zu können.

Zur Untersuchung des Teilentladungsverhaltens wird ein typischer Teilentladungsmesskreis nach DIN EN 60270 aufgebaut. Ein Hochspannungstransformator wird über eine Sperrinduktivität L mit einer Luft- SF_6 -Durchführung verbunden. Die anliegende 50-Hz-Wechselspannung wird über einen kapazitiven Messteiler ermittelt. Der Prüfgasraum wird mit einer $\text{C}_4\text{-FN}$ -Gas Mischung gefüllt und enthält die Elektrodenanordnung (Bild 1). Im unteren Teil des Prüfgasraumes ist ein handelsüblicher UHF-Sensor eingebaut, um Teilentladungen zu detektieren. Das Prüfgefäß ist zusätzlich mit einem Sichtglas für die optische Teilentladungsdetektion ausgestattet. Es wird außerdem ein Trenner-Erder-Modul eingebaut, das einen gasisolierten Koppelkondensator in Reihe mit einer Teilentladungsmessimpedanz an den Prüfgasraum anschließt (Bild 2). Mit Hilfe des Trenner-Erder-Moduls kann der Koppelkondensator von der Prüfanordnung getrennt werden. Dadurch wird bei zu realisierenden Durchschlagversuchen die Prüf- und Messtechnik geschützt.

Gegenstand der Untersuchung im Prüfgasraum ist eine bereits in [2] genutzte Elektrodenanordnung (Bild 1). Mit Hilfe eines Kugel-Platte-Modells wird eine schwach inhomogene Anordnung gebildet. Diese weist einen für gasisolierte Systeme typischen Homogenitätsgrad von $\eta \approx 0,52$ auf. Die Platte befindet sich auf Hochspannungspotential, die Kugelelektrode auf Erdpotential. An der Kugelelektrode ist mit Hilfe eines Polytetrafluorethylen-Adapters eine Nadelspitze mit definiertem Spitzenradius von $r \approx 20...25 \mu\text{m}$ befestigt. Die Nadelspitze erzeugt nach Anlegen einer Prüfspannung ein definiertes, stark inhomogenes elektrisches Feld, in dem die auftretenden Teilentladungen untersucht werden können.

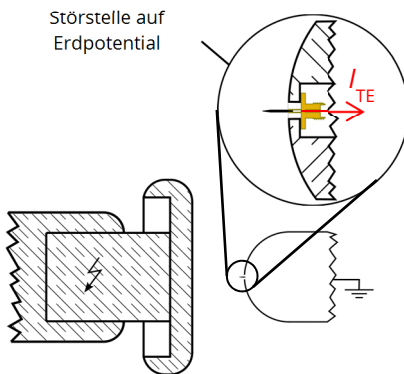


Bild 1: Elektrodenanordnung aus fester Störstelle auf Erdpotential und Platte auf Hochspannungspotential [2]

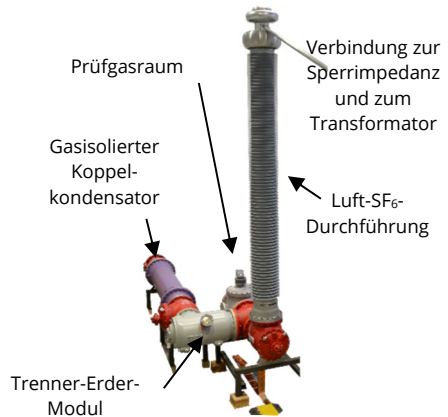


Bild 2: Bild des Teilentladungsprüfkreises

Im Rahmen des Forschungsprojekts werden die Teilentladungsimpulse mit Hilfe unterschiedlicher Techniken gemessen und die Ergebnisse miteinander verglichen. Mit einem Vier-Kanal-Oszilloskop können die Messwerte verschiedener Messmethoden und die zugehörigen Spannungswerte zeitsynchron erfasst werden. Gemessen werden der direkte Teilentladungsstrom I_{TE} über die Spitze auf Erdpotential, die Impulse im UHF-Bereich (100 MHz bis 2,2 GHz), die zuvor verstärkt werden sowie die optischen Entladungen. Die optische Messung erfolgt mit einem im ultravioletten Bereich sensitiven Fotovervielfacher, der den optischen Strom ausgibt. Des Weiteren wird ein Spektrumanalysator für die unmittelbare Messung der UHF-Spannung im Frequenzbereich genutzt. Für die Messung nach Norm DIN EN 60270 wird ein kommerzielles Messsystem verwendet, das die über den Kondensator ausgekoppelten Teilentladungsimpulse misst.

Die ersten Ergebnisse zeigen eine Abhängigkeit der Teilentladungskenngrößen vom verwendeten Isoliergasgemisch, dem Gasdruck und der elektrischen Feldstärke. Untersuchte Teilentladungskenngrößen sind unter anderem die Amplitude der Einzelentladungen, das phasenaufgelöste Teilentladungsmuster sowie die Wiederholrate der Entladungen.

- [1] C. Smith, N. Zebedee, et al. IPCC Sixth Assessment Report: Working Group 1: The Physical Science Basis. Ed. by Intergovernmental Panel on Climate Change. Genf, 2021.
- [2] T. Götz, "Teilentladungsverhalten von Gas-Feststoff-Isoliersystemen unter Gleichspannungsbelastung", Dissertation, Technische Universität Dresden, 2022.



Thomas Linde, Dipl.-Ing.

Auswirkungen harmonisch verzerrter Spannungen auf Teilentladungscharakteristika

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 Spannungsänderung (du/dt) und deren Zeitverlauf. Das Ziel der Untersuchungen ist 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 verschiedene Messgrößen der Teilentladungen, wie z. B. der mittleren scheinbaren Ladung Q_{avg} , zu identifizieren.

Dabei kommt für die experimentellen Untersuchungen eine Modellanordnung (Bild 1) zum Einsatz, die die wichtigsten Auswirkungen auf die Teilentladungen reproduzierbar und definiert abbildet.

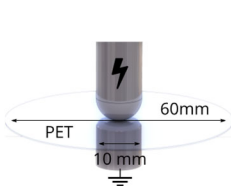


Bild 1: Elektrodenanordnung zur Erzeugung von Gleitentladungen auf PET-Folienprüflingen

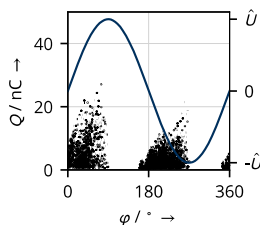


Bild 2: Gemessenes Teilentladungsmuster bei rein sinusförmiger 50-Hz-Wechselspannung

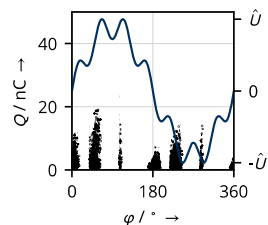


Bild 3: Gemessenes Teilentladungsmuster bei harmonisch verzerrter Spannung (Überlagerter siebte Harmonische mit THD = 20 %)

Die Kugel-Platte-Anordnung mit zwischengelegter Polyethylenterephthalat (PET)-Folie ruft auf der Oberfläche ladungsstarke Gleitentladungen hervor. Diese werden mit einem Messkreis nach DIN EN 60270 aufgezeichnet und die mittlere scheinbare Ladung Q_{avg} der Entladungen ausgewertet.

Die harmonisch verzerrten Spannungen haben dabei einen signifikanten Einfluss auf die Teilentladungsmuster im Vergleich zur unverzerrten 50-Hz-Wechselspannung (Bild 2 und Bild 3). Es zeigt sich, dass die häufigen Vorzeichenwechsel des Spannungsanstieges (du/dt) zum wiederholten Ein- und Aussetzen der Teilentladungen innerhalb einer Periode führen. Die Auswertung der Teilentladungsmessgrößen (Bild 4) zeigt, dass die Ordnung h der überlagerten harmonischen Spannung einen größeren Einfluss auf die gemessene scheinbare Ladung als die prozentuale Verzerrung (THD) hat. Tendenziell sinkt die gemessene scheinbare Ladung Q_{avg} mit höherfrequenter Überlagerung.

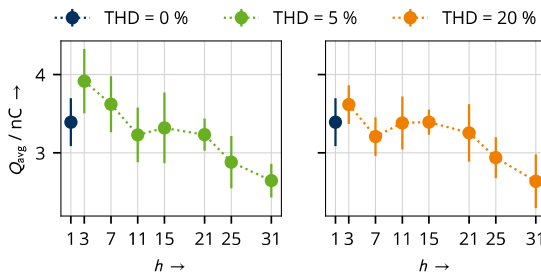


Bild 4: Gemessene mittlere scheinbare Ladungen Q_{avg} in Abhängigkeit der harmonischen Ordnung h . Mittelwert und Standardabweichung von jeweils 10 gemessenen Folien pro Spannungsform.

Das Ergebnis ist insofern überraschend, da die Gleitentladungen auf der Folienoberfläche hauptsächlich durch kapazitive Verschiebungsströme verursacht werden, die direkt proportional zum Spannungsgradienten (du/dt) sind. Mit harmonisch verzerrten Spannungen höherer Ordnung sind demnach höhere Verschiebungsströme und Teilentladungsströme und somit höhere Ladungswerte zu erwarten. Das Messergebnis spiegelt das nicht wieder, sodass hier noch weitere bisher nicht beachtete Effekte eine Rolle spielen. Eine mögliche Erklärung ist, dass die kürzere Dauer der einzelnen Teilentladungsintervalle (vgl. Bild 2 und Bild 3) die thermische Beanspruchung zeitlich so verteilt, dass die für starke Entladungen nötige Thermoionisation eingeschränkt wird. Pro Halbwelle der 50-Hz-Wechselspannung steht weniger Zeit für Entladungen zur Verfügung. Die gewählte Modellanordnung erlaubt auch das Durchführen von Lebensdaueruntersuchungen. Das Korrelieren der Teilentladungsuntersuchung mit den gemessenen Lebensdauerkennlinien eröffnet dann neue Möglichkeiten, um Ursachen der verstärkten Alterung durch harmonisch verzerrte Spannungen zu ergründen.

- [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. Zydróń, "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.



Johannes Hoffmann, M.Sc.

Untersuchungen am Isoliersystem hybrid-elektrischer Luftfahrt- Antriebssysteme

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Europäische Union hat sich eine umweltfreundliche, emissionsneutrale Luftfahrt bis 2050 zum Ziel gesetzt, [1]. Auf dem Weg dorthin spielen leichte, effiziente und robuste Subsysteme wie Generator, Elektromotor, Umrichter und Leistungselektronik eine zentrale Rolle für Flugsysteme. Der Fokus des Projektes ist die technologische Befähigung vollelektrischer und hybrid-elektrischer Antriebssysteme für eVTOL (electric Vertical Take-Off and Landing

aircraft) und Flugzeuge der Klasse CS23 (bis 19 Passagiere). Der Vortrieb und Auftrieb wird hierbei durch Elektromotoren gewährleistet. Im Falle von hybrid-elektrischen Systemen wird die benötigte elektrische Energie durch einen Generator, der an eine Gasturbine angeschlossen ist, bereitgestellt. Zum aktuellen Zeitpunkt gibt es keine zugelassenen Serienmodelle für den Personentransport, die eine rotierende elektrische Maschine als Antrieb nutzen. Im Betrieb ist



Bild 1: eVTOL, Quelle: Rolls-Royce

das Isoliersystem der Aktivbauteile starken Beanspruchungen ausgesetzt. Das dadurch beeinflusste Alterungsverhalten des Isoliersystems und einzelner Werkstoffe ist derzeit nicht bekannt. Da dies ein wesentliches Sicherheitsrisiko darstellt, ist es zwingend erforderlich dieses genau zu kennen. Aufgrund fehlender Normen für die Luftfahrt wurden die Belastungen anhand der Normen DO160 [2] und DIN EN 60034-18-41 [3] aufgestellt. Diese, auf das elektrische Isoliersystem rotierender Maschinen wirkenden, Belastungen lassen sich in die vier Kategorien **T**hermisch, **E**lektrisch, **A**mbient/Umgebung und **M**echanisch (TEAM-Belastung) einteilen. Eine besondere Herausforderung an das Isolationsmaterial stellen die thermischen Bedingungen des Motors dar. Aufgrund der möglichst geringen Masse des Motors weist dieser eine hohe Leistungsdichte auf. Um dies zu erreichen, ist die Stromdichte in den Leitern hoch, verglichen zu anderen eingesetzten Elektromotoren, was zu einer hohen Betriebstemperatur des Leiters und der Isolation führt. Außerdem stellen die Betriebs- und Schaltfrequenz der Pulsweitenmodulierten (PWM) Betriebsspannung eine Herausforderung dar. Hierdurch kommt es zu einer starken elektrischen Belastung und Feldüberhöhungen die zu Teilenladungen (TE) führen können. Da diese das Isoliersystem degradieren und die Intensität der Schädigung mit sinkendem Luftdruck, sprich zunehmender Flughöhe zunimmt, sind diese per Design auszuschließen. Neben der Spannungshöhe beeinflusst die Spannungsform das TE-Verhalten. [4] Die Entwicklung von Silicon Carbide (SiC) Transistoren in der Leistungselektronik hat über die letzten Jahre dazu geführt, dass die leistungselekt-

ronischen Motoransteuerungen effizienter und gleichzeitig leichter geworden sind. [5] Herausforderungen hieraus sind vor allem hinsichtlich des TE-Verhaltens, verursacht durch die steileren Spannungsanstiege der PWM Betriebsspannung, zu erwarten. Da diese bisher nicht ausreichend bekannt sind, liegt der Fokus auf der Ermittlung der TE-Einsatzspannung um diese im Betrieb zu vermeiden. Die Auswirkungen der in Bild 2 dargestellten TEAM-Belastungen auf das Isoliersystem werden durch sich wiederholende Prüfzyklen, ermittelt.

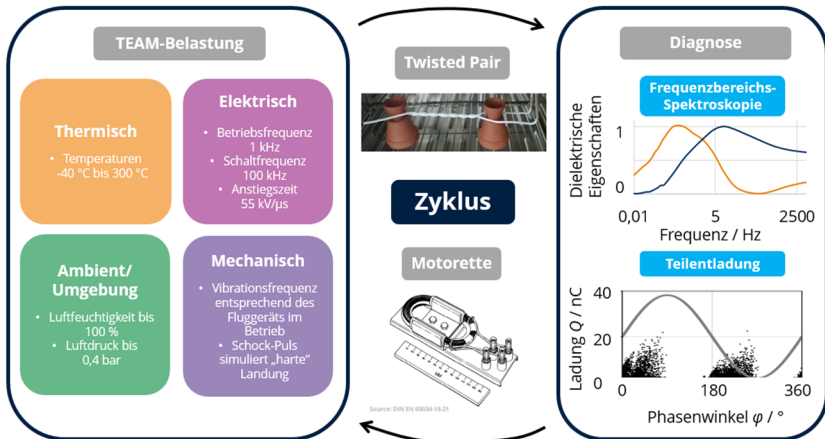


Bild 2: Zyklische TEAM Belastung und Diagnose

Als Prüflinge werden zum einen Twisted Pairs und zum anderen Motoretten untersucht. Die Prüflinge werden durch die TEAM-Belastungen beansprucht und anschließend die Auswirkungen auf das Material (Twisted Pair) bzw. das System (Motorette) mittels Frequenzbereichs-Spektroskopie und Teilentladungsmessung untersucht.

- [1] European Commission, "Flightpath 2050", 2011 Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- [2] EUROCAE ED-14G, "Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment", Mai 2011, EUROCAE
- [3] DIN EN 60034-18-41:2021-05 "Qualifizierung und Qualitätsprüfung für teilentladungsfreie elektrische Isoliersysteme (Typ I) in drehenden elektrischen Maschinen, die von Spannungsumrichtern gespeist werden"
- [4] T. Lebey, A. Rumi and A. Cavallini, "Challenges for Electrical Insulation Systems in High Voltage Aviation Applications," in *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 38, no. 6, pp. 5-11, November/December 2022
- [5] H. Kogure, K. Ishikawa, Y. Kohno, T. Sakai and T. Ishigaki, "Development of Low Loss Inverter System-Adopted Lower Harmonic Losses Technology and Ultra Compact Inverters Adopted High Power Density SiC Module," 2018 20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe), 2018, pp. P.1-P.7.



Alexander Schindler, Dipl.-Ing.

PREPARE–Entwicklung eines Technologiekonzeptes für die Behandlung industrieller Prozesswässer mittels eines photokatalytisch gestützten Niedertemperaturplasma-Prozesses

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Förderkennzeichen: 02WQ1600C

Die Textilbranche ist ein weltweit bedeutender Industriezweig mit einem Gesamtmarktwert von ca. 800 Mrd. € [1]. Die Fertigung und Verarbeitung der Textilien geht dabei mit einem hohen Einsatz verschiedener Chemikalien und einem hohen Wasserverbrauch einher [2]. Einen erheblichen Anteil der Chemikalien machen dabei Farbstoffe aus [3]. Das Problem dieser Chemikalien liegt in der hohen Toxizität für Mensch und Natur, aber auch in der limitierten biologischen Abbaubarkeit [2]. Nach dem heutigen Stand der Technik werden Industrieabwässer aus diesem Grund vor ihrer Rückleitung in das städtische Abwasser meist mehrstufig vorbehandelt. Die dabei angewandten Behandlungsmethoden sind bisher mit hohen Betriebskosten und einer teuren Reststoffentsorgung verbunden [4]. Ziel des Projektes ist es daher, die Umweltfreundlichkeit der notwendigen Prozesse zu erhöhen und gleichzeitig die Kosten für die Abwasseraufbereitung zu senken.

In den letzten Jahren ist die Behandlung von Industrieabwässern auf Basis der Niedertemperaturplasma-Technologie anhand von Modellabwässern untersucht worden [5]. Dieses Verfahren soll weiterentwickelt und in Kombination mit photokatalytisch aktiven Materialien eingesetzt werden, um eine hohe Wirksamkeit der Abwasserbehandlung zu erzielen. Dieser Ansatz basiert auf einer hochspannungsimpulsinduzierten Ionisierung von Wasser und/oder Luft und einer damit einhergehenden Generierung einer hochreaktiven radikalischen Spezies. Der Einsatz photokatalytisch aktiver Materialien wie z.B. Titandioxid (TiO_2) steigert die Formierung dieser Spezies [6]. Am Ort der Entstehung reagieren diese mit den Stoffen des Abwassers weitestgehend unselektiv unter Bildung kleinerer Fragmente.

Fokus des Vorhabens ist die Überführung dieser neuen Abwasseraufbereitungsmethode in einen anwendungsorientierten Maßstab. Um einen robusten Betrieb des Reaktors realisieren zu können, gilt es geeignete Materialien der Elektroden und Isolierstoffbarrieren des Aufbereitungsreaktors mit Hilfe eines Lebensdauerversuchsstandes auszuwählen (Bild 1). Für die Isolierstoffbarrieren kommen Werkstoffe aus den Gruppen Keramiken, Gläser und Kunststoffe in Frage. Die Elektroden und Isolierungen sind hohen elektrochemischen Beanspruchungen durch die Teilentladungen,

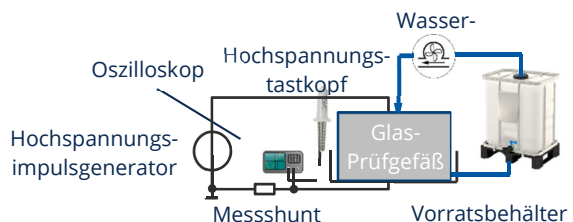


Bild 1: Konfiguration des Lebensdauerversuchsstandes

das Abwasser in Tropfenform, sowie durch Ozon und andere Nebenprodukte ausgesetzt. In einem Prüfgefäß werden die Lebensdauerkennlinien und die Beanspruchungsgrenzwerte der zu untersuchenden Isolierwerkstoffe und Elektrodenbeschichtungsmaterialien ermittelt. Die Prüfspannung liefert ein Hochspannungsimpulsgenerator. Um die im Prozess auftretenden prinzipiellen Belastungen des Isolierstoffes zu modellieren wird aus einem Tank Wasser mit verschiedener elektrischer Leitfähigkeit und verschiedener Durchflussmenge in das Prüfgefäß gepumpt.

Das Verfahren basiert auf einer steten elektrischen Entladung im Reaktorraum. Zur Abschätzung der Ökonomie des Prozesses ist es sinnvoll die im Reaktor umgesetzte elektrische Leistung zu messen (Bild 2). Mittels geeignetem Hochspannungstastkopf, Messshunt sowie einem Oszilloskop mit ausreichender Bandbreite, werden die an den Elektroden des Reaktors anliegenden elektrischen Größen Strom und Spannung gemessen.

Mithilfe der Messung kann die für den elektrochemischen Prozess spezifische elektrische Energie bestimmt werden. Die Ergebnisse der Messung bilden weiterhin die Basis für die Berechnung einer zukünftigen Skalierung des Reaktors auf einen realen Anwendungsmaßstab. Im nächsten Schritt gilt es den Lebensdauerversuchsstand sowie die Leistungsmessung zu dimensionieren.

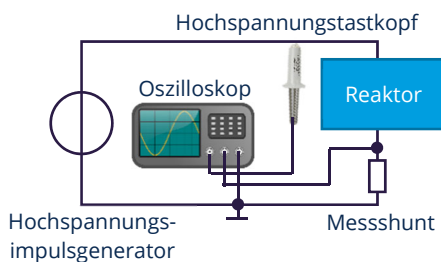


Bild 2: Versuchsanordnung zur Bestimmung der Leistungsbilanz des Prüfreaktors

- [1] A. Sachidhanandham, A.P. Periyasamy, „Environmentally Friendly Wastewater Treatment Methods for the Textile Industry.“ In Handbook of Nanomaterials and Nanocomposites for Energy and Environmental Applications, O.V. Kharissova, et al., Ed. Schweiz: Springer Nature Switzerland AG, 2020, pp. 2269-2307. DOI: 10.1007/978-3-030-36268-3_54
- [2] D. Bhatia, N.R. Sharma, J. Singh, R.S. Kanwar, „Biological methods for textile dye removal from wastewater: A review,“ Critical Reviews in Environmental Science and Technology, vol. 47, pp. 1836-1876, 2017. DOI: 10.1080/10643389.2017.1393263
- [3] A.P. Periyasamy, S.K. Ramamoorthy, S. Rwawiire, Y. Zhao, „Sustainable Wastewater Treatment Methods for Textile Industry.“ In Textile Science and Clothing Technology, S.S. Muthu, Ed. Singapur: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2018. DOI: 10.1007/978-981-10-8591-8_2
- [4] 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., 2019. DOI: 10.1007/978-981-10-8669-4_11
- [5] M. Amrial, K. Kusumandari, T.E. Saraswati, Y.H. Suselo, „Textile Wastewater Treatment by Using Plasma Corona Discharge in a Continuous Flow System,“ IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 578, pp. 1-5. 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/578/1/012016
- [6] T. Mitrović, N. Tomić, A. Djukić-Vuković, Z. Dohčević-Mitrović, S. Lazović, „Atmospheric Plasma Supported by TiO₂ Catalyst for Decolourisation of Reactive Orange 16 Dye in Water,“ Waste Biomass Valorization, vol. 11, pp. 6841-6854, 2020. DOI: 10.1007/s12649-019-00928-y#

Projekte zum Forschungsschwerpunkt „Strombelastbarkeit und Erwärmung“



Robert Adam, Dr.-Ing.

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



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Im Forschungsprojekt **AC²DC** sollen bestehende AC-Kabelstrecken in der Mittel- und Niederspannungsebene in Punkt-zu-Punkt-DC-Verbindungen umgewandelt werden. Die Optimierung des Netzes hat das Ziel, größere Leistung als mit AC-Kabelstrecken zu übertragen und den Blindleistungsbedarf besser regeln zu können. 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-Kabel und Muffen den veränderten Beanspruchungen durch DC-Lastungen standhalten können.

Eine der wesentlichen Eigenschaften für die übertragbare Leistung der DC-Kabelstrecken ist die Strombelastbarkeit. Die Strombelastbarkeit von Kabeln wird maßgeblich durch deren Erwärmung im Betrieb bestimmt.

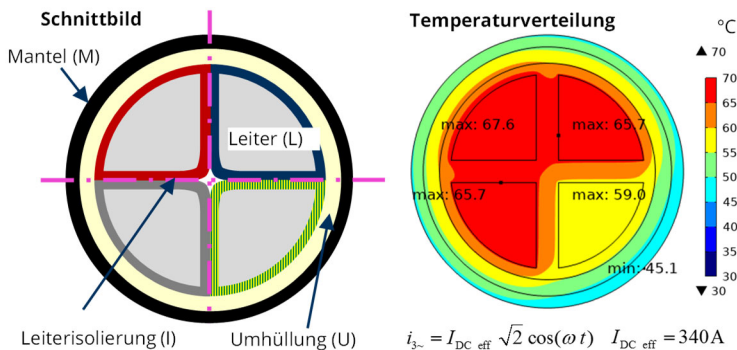


Bild 1: Schnittbild des Querschnittes und berechnete Temperaturverteilung eines NAYY 4 x 240 Kabels bei einer Umgebungstemperatur $\vartheta_b = 20 \text{ °C}$ bei Belastung mit Drehstrom

Um die Erwärmung für unterschiedliche Bedingungen (Strombelastung, Umgebungsbedingungen) berechnen zu können, müssen thermische Modelle aufgebaut werden. Dabei werden zunächst FEM-Modelle (Finite-Elemente-Methode) (Comsol) der einzelnen Komponenten entwickelt (Bild 1).

Ein bedeutender Vorteil der FEM ist die gute Beschreibung der Wärmeleitungsprozesse. Damit können die Temperaturverteilungen im Querschnitt und entlang der Kabel und Muffen mit hohen Auflösungen dargestellt und so die dominanten Pfade der Wärmeflüsse ermitteln werden. Für praktikable Rechenzeiten bei hoher Auflösung der Temperaturverteilung sind FEM-Modelle nach Längen von wenigen Metern limitiert. Daher werden anschließend alle Komponenten nach der Wärme-Netz-Methode (WNM) (Orcad) aufgebaut. Der Vorteil der WNM-Modelle besteht in einer effizienten Beschreibung des Wärmetransports durch Strahlung und Konvektion und einer sehr geringen Rechenzeit. Mit der WNM können thermische Modelle einzelner Komponenten entwickelt werden, die modular miteinander zum Modell einer Kabelstrecke kombiniert werden können.

Zum Beispiel lässt sich aus der Analyse der Temperaturverteilung des FEM-Modells eines NAYY 4 x 240 Kabels (Bild 1) ein WNM-Modell entwickeln, dass trotz seiner diskreten Wärmenetzelemente die Temperaturverteilung detailliert genug auflösen kann (Bild 2).

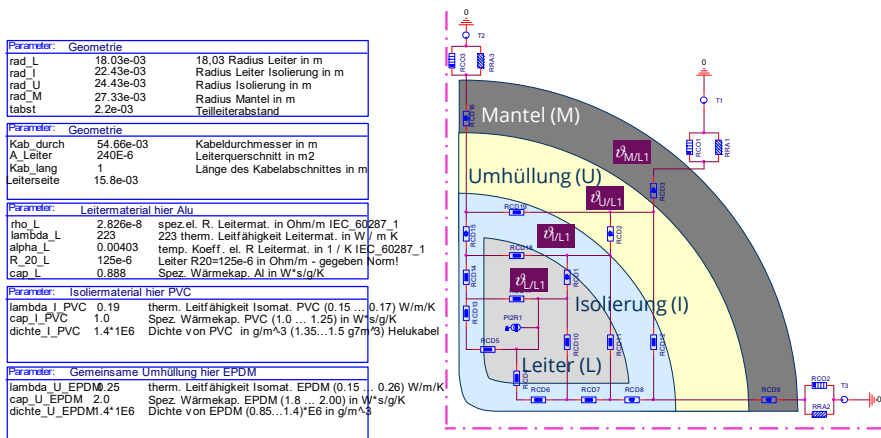


Bild 2: Querschnitt des Wärmenetzes (Viertel) eines NAYY 4 x 240 Kabels



Markus Schladitz, Dipl.-Ing.

**Untersuchungen zur Reduktion der Klemmkraft
unter mechanischer und thermischer Belastung
von Klemmen für elektrische Weichenheizstäbe**

ProRail

In den Wintermonaten können Ansammlungen von Schnee und Eis an den beweglichen Teilen einer Weiche zum Verlust der Stellfähigkeit der Weiche führen. Verspätungen und Ausfälle von Zugverbindungen sind häufig die Folge. Elektrische Weichenheizstäbe werden häufig im europäischen Raum verwendet, um die Funktionstüchtigkeit der Weichen zu erhalten. Dabei wird thermische Energie im Heizstab durch Stromwärmeverluste erzeugt und durch Wärmeleitung an die Schiene übertragen. An der Schienenoberfläche können Schnee und Eis geschmolzen werden und eine Anhäufung wird verhindert. Dieser Vorgang ist abhängig vom Wärmeübergang zwischen Heizstab und Schiene.

Weichenheizstäbe werden typischerweise mit Klemmen, im Abstand von 30 cm zueinander, am Fuß der Backenschiene befestigt. Untersuchungen mit einer Wärmebildkamera zeigten eine deutlich ungleichmäßige Temperaturverteilung auf der Oberfläche des Heizstabs in Längsrichtung innerhalb eines Abschnittes zwischen zwei Klemmen (Bild 1, Bild 2).

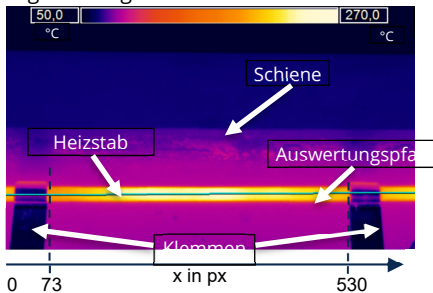


Bild 1: Wärmebild von Heizstab und Schiene bei einer Umgebungstemperatur von 22 °C für eine Heizleistung von 300 W m⁻¹ und einem Emissionsgrad $\varepsilon = 0,87$

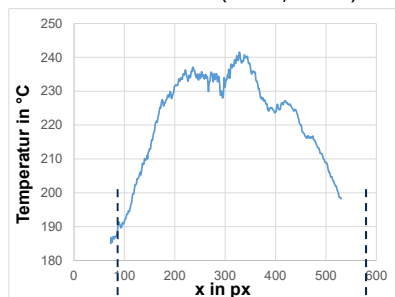


Bild 2: Gemessene Temperaturverteilung entlang des grünen Auswertungspfades (Bild 1) bezogen auf das jeweilige Bildpixel

Die Temperaturdifferenz von ca. 55 K deutet auf eine ungleichmäßige Verbindungskraft zwischen Heizstab und Schiene in Längsrichtung hin. Die Klemmkraft von Heizstabsklemmen muss zunächst bestimmt werden, um den Wärmeübergang im relevanten Bereich der Verbindungskraft zu bestimmen. Dafür wurde die Klemmkraft von 85 neuwertigen Klemmen mit einem modifizierten Zugversuch ermittelt (Bild 3).

Weiterhin unterliegen Klemmen für Weichenheizstäbe mechanischen und thermischen Belastungen während des Betriebs, die zu einer Reduktion der Klemmkraft führen können. Um diesen Einfluss zu bestimmen, wurden die Belastungsgrößen für die Lagerzeit von 4000 h nachgebildet.

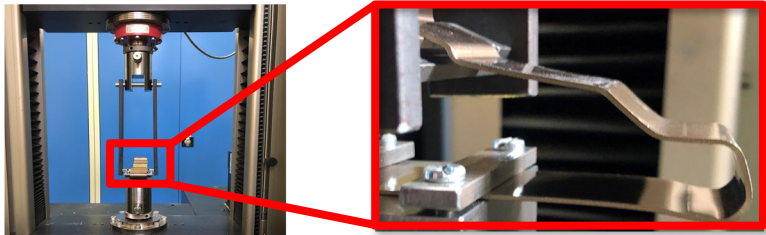


Bild 3: Modifizierter Zugversuch zum Ermitteln der Klemmkraft

Mechanisch wurden die Klemmen entweder auf einem Schienenfuß installiert oder entspannt gelagert. Thermisch wurden die Klemmen entweder bei Raumtemperatur, bei 150 °C oder bei 200 °C gelagert. Die hohen Temperaturwerte wurden anhand von Messergebnissen von Weichenheizstäben im Betrieb gewählt. Aus der Kombination der mechanischen und der thermischen Belastung lassen sich sechs verschiedene Gruppen bilden, auf die die Klemmen verteilt wurden. Innerhalb des gesamten Belastungszeitraums wurden die Klemmen mehrmals gemessen.

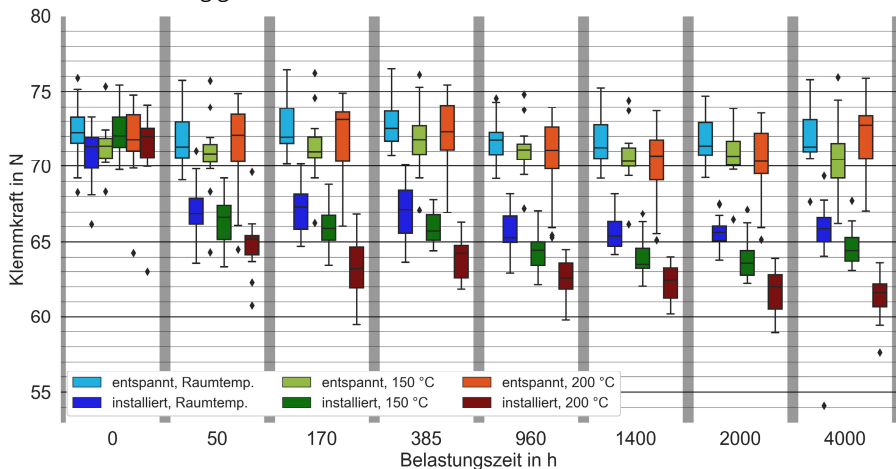


Bild 4: Boxplot der Klemmkraft mit Median, oberem und unterem Quartil, zugehörigen Whisker und Ausreißern für verschiedene Kombinationen von thermischen und mechanischen Belastungen in Abhängigkeit der Belastungszeit

Die Messergebnisse zeigen, dass sich die Klemmkraft bei den mechanisch belasteten Proben verringert, insbesondere bei gleichzeitiger thermischer Belastung. Nach 4000 h hat die Klemmkraft in diesem Fall um ca. 15 % abgenommen.

Der relevante Kraftbereich des Wärmeübergangs abhängig von der Verbindungskraft wurde bestimmt und es kann anschließend untersucht werden, ob die Reduktion der Klemmkraft einen Einfluss auf den Wärmeübergang besitzt.



Michal Sokolowski,
Dipl.-Ing.



GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Stromtragfähigkeit der Leiter in Systemen für die Erzeugung von grünem Wasserstoff

Um den Bedarf an grünem Wasserstoff decken zu können, sollen in Deutschland bis 2030 im Rahmen der Nationalen Wasserstoffstrategie 5 Gigawatt Elektrolyse-Kapazität aufgebaut werden. Die Technologien für Erzeugung, Transport und Nutzung von grünem Wasserstoff werden in drei Wasserstoff-Leitprojekten umfassend weiterentwickelt. Das Leitprojekt *H₂Giga* mit 26 Verbünden und insgesamt über 130 Projektpartnern aus Forschung und Industrie widmet sich der Technologieentwicklung zur serienmäßigen Herstellung von Wasser-Elektrolyseuren, die modular an ihre jeweiligen Einsatzorte angepasst werden können. Das Verbundprojekt *H₂LeiT* ist im *H₂Giga*-Konsortium für die Entwicklung von kostenoptimierter Systemtechnik und Netzintegration von Anlagen 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. Neben dem Gleichrichter soll auch die dazugehörige Verbindungstechnik konzipiert und dimensioniert werden. Um die hohen elektrischen Leistungen > 20 MW zwischen dem Transformator (AC-Seite), dem Elektrolyse-Stromrichter und dem Elektrolyseur (DC-Seite) übertragen zu können, sollen möglichst material- und kostensparende Hochstrom-/Hochtemperaturleiter für Ströme im kA-Bereich zum Einsatz kommen. Im Zusammenhang mit hohen angestrebten Strömen und den dadurch bedingten hohen Leitertemperaturen sowie der kompakten gekapselten Bauweise mit vielen anderen Systemkomponenten, die zu der Fremderwärmung der Leiter beitragen, muss ein detailliertes Kühlkonzept entwickelt werden.

Zunächst soll überprüft werden, inwiefern die bereits existierenden Erkenntnisse und technischen Lösungen aus dem Bereich der PV-Anlagen sich auf die neuartigen Elektrolysegleichrichter übertragen lassen. 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, kommen numerische Methoden zusammen mit experimentellen Untersuchungen zum Einsatz.

Es 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 ϑ_w , Emissionszahl ϵ_w) von ca. $(1 \times 1,5 \times 0,5) \text{ m}^3$. Mit Hilfe eines Radiallüfters wird in den oberen Bereich ein einstellbarer Luftvolumenstrom $\dot{V}$ mit der Temperatur ϑ_E

eingespeist, der den Aufbau durch drei Auslassöffnungen unten mit der Lufttemperatur ϑ_A wieder verlässt. Somit ergibt sich eine örtliche Geschwindigkeitsverteilung der Strömung $\vec{v}(\vec{r})$ die maßgebend für die erzwungene Konvektion der Stromschienen in dem Untersuchungsgebiet ist. Überlagerung der Wärmeerzeugung, Wärmespeicherung und Wärmeübertragung liefert die örtliche Temperaturverteilung in den Schienen (Bild 2). Es kann so u. a. bewertet werden, ob die festgelegte Grenztemperatur von 120 °C eingehalten wird und ob die Schienen thermisch ausreichend dimensioniert sind.

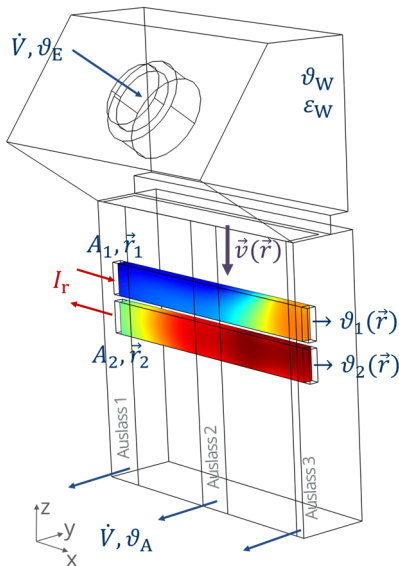
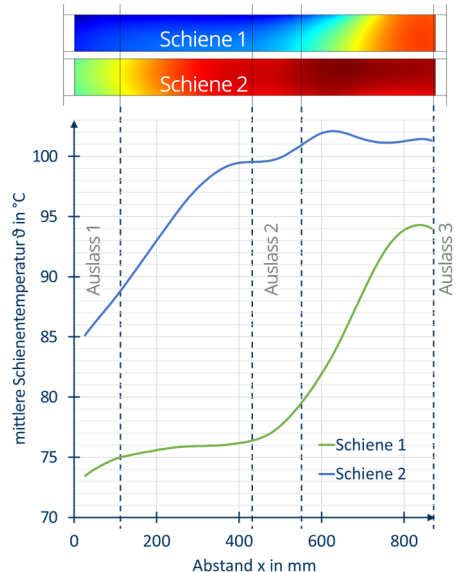


Bild 1: Modell zur Erwärmungsberechnung

Bild 2: Temperaturverteilung für $I_r = 7 \text{ kA}$,
 $\vartheta_E = 60 \text{ °C}$, $\vartheta_W = 55 \text{ °C}$, $\dot{V} = 2800 \text{ m}^3/\text{h}$

Die Temperaturverteilung der Stromschienen ist infolge der örtlichen Luftgeschwindigkeitsverteilung stark inhomogen, was entlang der Schienen in x-Richtung am deutlichsten zu sehen ist. Dementsprechend ergibt sich auch eine inhomogen verteilte Verlustleistungsdichte. Die Temperaturprofile der beiden, mit gleich großem Strom belasteten, Schienen fallen unterschiedlich aus.

Der Einfluss der einzelnen Parameter auf die Temperaturverteilung konnte mit geeigneten Studien mit Hilfe des Modells untersucht werden. Die Simulationsergebnisse werden mit Hilfe eines geeigneten Versuchsaufbaus verifiziert und als Grundlage für die thermische Dimensionierung der Verbindungstechnik für die Elektrolyseurgleichrichter genutzt.

Publikationen

Vorträge

C. Hildmann:

Kontaktverhalten und Langzeitverhalten der Verbindungstechnik für Kabel.

Werkstatt Kabel 2022,

Wiesbaden, 30.11-01.12.2022.

T. Israel, C. Hildmann, S. Schlegel, F. Ostendorf, U. Hauck, H. Schmidt, M. Ludwig:

Wie die technische Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur erhöht werden kann! –Verschleiß von Ladesteckverbindungen und mögliche Folgen für den Ladebetrieb.

ChargeTec,

Hybrid-Konferenz, 17.05.2022.

M. Ludwig, T. Israel:

Field data-based, systemic analysis of DC charging connector during high-power charging considering damage and wear.

10. Internationaler Fachkongress Bordnetze im Automobil21,

Ludwigsburg, 21.-26.06.2022.

S. Schlegel:

Neue Aluminiumwerkstoffe für die Elektroenergietechnik.

8. Werkstoffsymposium,

Dresden, 02.-03.06.2022

S. Schlegel:

Elektrisches Kontaktverhalten geclinchter Kupfer- und Kupfer-Aluminium-Verbindungen bei Fehlerströmen,

12. Gemeinsames Kolloquium zur Mechanischen Fügetechnik

Rostock, 23.-24.11.2022

Veröffentlichungen

L. Büttner, M. Oberst, C. Hildmann, S.: Schlegel:

Einfluss konstruktiver Parameter auf das Schaltverhalten von NH-Sicherungseinsätzen bei Überlast.

26. Fachtagung Albert-Keil-Kontaktseminar,

Karlsruhe, 30.03.-01.04.2022.

L. Büttner, M. Oberst, C. Hildmann, S.: Schlegel:

Influence of geometry, solder position and volume on the fusing time of silver fuse elements with tin solder at low overcurrents in low-voltage power fuses.

31st international conference on Electrical Contacts,

Sapporo, Japan, 13.-16.06.2022.

A. Dowbysch, T. Götz, S. Schlegel:

Generation of Reproducible HVDC-Impulse Composite Voltage Waveforms Using a Triggered Spherical Spark Gap.

VDE-Fachtagung Hochspannungstechnik,
Berlin, 2022.

A. Dowbysch, T. Götz, H.-P. Pampel, K. Backhaus, S. Schlegel:

Impact of Different Blocking Elements on the DC-Impulse Composite Waveform.

CIGRE Session,
Paris, 2022.

U. Riechert, E. Sperling, A. Dowbysch:

Diagnostic and testing on GIS voltage dividers for HVDC applications.

CIGRE Session,
Paris, 2022.

J. Meisner, T. Steiner, A. Dowbysch, U. Schichler, O. Pischler, A.-P. Elg, F. Garnacho, E.

Gockenbach, H. Schorn, M. Gamlin, K. Lathi, J. Havunen, A. Merev, P. Roccato, A. Orrea, H. Saadeddine:

Contribution to the standardisation of measurement of composite and combined high voltages.

CIGRE Session,
Paris, 2022.

A. Dowbysch:

Herausforderungen beim Erzeugen, Messen und Auswerten zusammengesetzter Spannungen zur Prüfung der Betriebsmittel der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung.

HIGHVOLT Zwischenruf,
Online, 2022.

L. Elspaß, S. Schlegel, H. Bärnklaus:

Comparison of Methods to Detect Thermomechanical Ageing of the Insulation System for Rotating High-Voltage Machines.

Nordic Insulation Symposium,
Trondheim, 2022.

L. Elspaß, K. Backhaus, S. Schlegel, J. Stahl:

Comparative Study on Different Outer Corona Protection Materials for Rotating High-Voltage Machines.

IEEE 4th International Conference on Dielectrics (ICD),
Palermo, 2022.

M. Gödicke, C. Hildmann, S. Schlegel, J. Unterfinger:

Electrical-thermal Operating Behavior of Aged Compression Type Power Connections.

31st International Conference on Electrical Contacts,
Sapporo, Japan, 13.-16.06.2022.

T. Israel, C. Hildmann, S. Schlegel, H. Schmidt, M. Ludwig:
Methodik zur Bewertung der Kontaktgüte von Ladesteckverbindungen für Fahrzeuge unter Labor- und Realbedingungen.

26. Albert-Keil Kontaktseminar,
Karlsruhe, 30.03-01.04.2022.

T. Israel, M. Oberst, C. Hildmann, S. Schlegel:
Selbstschmierende Beschichtungen für Hochstrom-Steckverbindungen.

26. Albert-Keil Kontaktseminar,
Karlsruhe, 30.03-01.04.2022.

T. Israel, M. Oberst, C. Hildmann, S. Schlegel:
Self-lubricating coatings for high-current connectors.

31st International Conference on Electrical Contacts,
Sapporo, Japan, 13.-16.06.2022.

T. Linde, K. Backhaus, S. Schlegel, S. Lengsfeld, and J. Steffen:
Partial Discharge Behavior of Epoxy-Mica Insulation System under Superimposed AC and DC Voltage Stress.

Nordic Insulation Symposium,
Trondheim, 2022.

T. Linde, K. Backhaus, S. Schlegel, J. T. Loh, and S. Kornhuber,;
The Influence of Temperature on the Dielectric Losses of Epoxy Resin Under Harmonic Distorted Voltages.

IEEE 4th International Conference on Dielectrics (ICD),
Palermo, 2022.

T. Linde, S. Schlegel:
Effects of Harmonic Voltage Distortion on Partial Discharge Characteristics on Polymeric Insulation Foil.

VDE-Fachtagung Hochspannungstechnik,
Berlin, 2022.

M. Oberst, C. Hildmann, S. Schlegel:
Einfluss von Grenzflächenreaktionen auf das Kontakt- und Langzeitverhalten von kraftschlüssigen Verbindungen mit unterschiedlichen Werkstoffkombinationen.

26. Albert-Keil Kontaktseminar,
Karlsruhe, 30.03-01.04.2022.

M. Pomsel, T. Israel, C. Hildmann, S. Schlegel, T. Kufner:
Influence of the Degree of Freedom in Normative Test Conditions on the Short-Circuit Behavior of Power Plug-In Connectors.

67th IEEE Holm Conference,
Tampa, Florida, USA, 24.-27.10.2022.

- M. Pomsel, T. Israel, C. Hildmann, S. Schlegel, T. Kufner:
Electromagnetic Modelling of Current Density Distribution in Power Plug-In Connectors.
31st International Conference on Electrical Contacts,
Sapporo, Japan, 13.-16.06.2022.
- M. Schladitz, M. Huter, R. Adam, S. Schlegel:
Investigations on the influence of mechanical and thermal load on the clamping force of
heating rod clamps.
7th Cetra Conference on Road and Rail Infrastructure,
Pula, Kroatien, 11.-13.05.2022.
- S. Schlegel:
Design criteria and long-term behaviour of current-carrying bolted joints.
31. International Conference on Electrical Contacts,
Sapporo, 2022.
- S. Schlegel, M. Oberst, C. Hildmann:
Vergleich der Belastung stromführender Leiter und Verbindungen der Elektroenergietechnik mit denen der E-Mobilität.
26. Albert-Keil Kontaktseminar,
Karlsruhe, 30.03-01.04.2022.
- S. Schlegel:
Auslegungskriterien für stromführende Schraubenverbindungen..
7. VDI-Fachtagung Schraubenverbindung - Berechnung,
Gestaltung, Montage, Anwendung,
Berlin, 2022.
- J. Kalich, M. Matzke, P. Wolfgang, S. Schlegel, L. Kornhuber, U. Füssel:
Long-Term Behavior of Clinched Electrical Contacts.
MDPI Metals,
2022.
- F.S.D. Poudeu, M. Beilner, S. Schlegel:
Impact of additive thermal loads on the long-term behaviour of current-carrying bolted joints made of tinned and nickel-plated aluminum and copper conductor materials in electrical vehicle.
Materialwiss. Werkstofftech.,
2022.
- M. Sokolowski, R. Adam, S. Schlegel:
Thermische Dimensionierung der Hochstromleiter für die Systemtechnik für die Erzeugung von grünem Wasserstoff.
1. H2Giga-Statuskonferenz,
Frankfurt a.M., 07.-09.09.2022.

Forschung zu stromstarken Störlichtbögen in der Niederspannung

Das National Arc fault Research Center (NARC) forscht zu dem Verhalten von Störlichtbögen und deren Auswirkungen auf Anlagen und Personen. Ziel ist die ultraschnelle Erkennung zur Vermeidung bzw. Reduzierung der Folgen von Störlichtbögen. Die schnelle Erkennung verringert die Einwirkzeit und folglich das Zerstörungspotential beim Auftreten von Fehlerfällen in stromstarken Niederspannungs-Schaltanlagen.

Untersuchung von Einflussgrößen auf das Verhalten von Störlichtbögen

Es gibt elektrische und nichtelektrische Einflussgrößen, die sich auf das Verhalten von Störlichtbögen auswirken. In experimentellen Untersuchungen wird deren Abhängigkeit auf das Verhalten von Störlichtbögen ermittelt. Die Erkenntnisse fließen in die Entwicklung von Störlichtbögen mit ein und dienen dazu, das Verhalten von Störlichtbögen bei gegebenen Anlagen- und Netzparametern abschätzen zu können.

Untersuchung des Kurzschlussverhaltens von DC-Anlagen

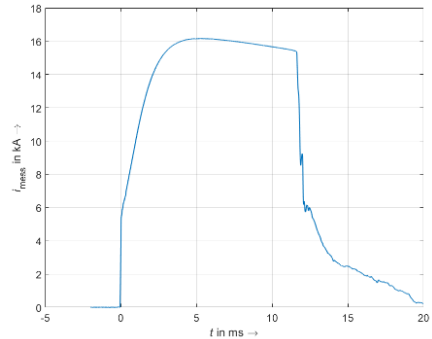
Eine wichtige elektrische Einflussgröße für die Abschätzung der Auswirkungen von Störlichtbögen stellt der Kurzschlussstrom dar. Der Strukturwandel innerhalb der Elektroenergieversorgung führt zu einem steigenden Einsatz von Gleichstromanlagen, wie z. B. im Bereich der Elektromobilität. Trotz sorgfältiger Planung, regelmäßiger Wartung und durchdachter Betriebsweise kann es in derartigen DC-Anlagen zum Auftreten von Fehlern wie z.B. Kurzschlüssen (KS) kommen. Die Belastung im Kurzschlussfall zählt zu den wichtigsten zu dimensionierenden Größen bei der Auslegung von Betriebsmitteln und Schutzsystemen. Der Modellierung des Kurzschlussverhaltens dieser Anlagen kommt demnach eine große Bedeutung bei der Anlagenplanung zu.

Messung des Kurzschlussverhaltens von DC-Anlagen

Für die Modellierung des Kurzschlussverhaltens von DC-Anlagen ist die Durchführung von Messungen notwendig. Anhand der Messungen lassen sich die Modelle validieren. Am NARC wurden entsprechende Messungen an Lilon-Batterien durchgeführt.



Aufbau zur Untersuchung des Kurzschlussverhaltens von Lilon-Batterien



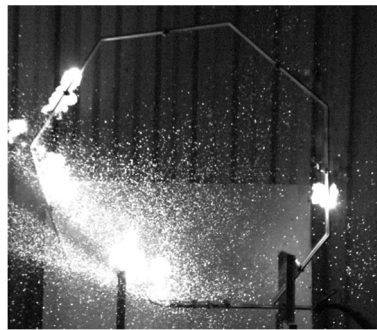
Gemessener Verlauf des Kurzschlussstroms einer Lilon-Batterie

Ausbau der Versuchsinfrastruktur

Um die vielfältigen Auswirkungen von Störlichtbögen charakterisieren zu können, wird eine umfassende Mess- und Sensortechnik benötigt. Neben der Aufnahme von Strom- und Spannungssignalen umfasst die bestehende Messinfrastruktur bereits Sensorik für die Aufnahme von Temperatur, Licht (UV, sichtbar, infrarot) und Druck. Mit der Anschaffung einer neuen Hochgeschwindigkeitskamera soll die Wanderung der Lichtbogenfußpunkte sowie die Bewegung der Lichtbogensäule zukünftig detaillierter untersucht werden können. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Hochgeschwindigkeitskameras am NARC getestet.



Versuchsaufbau mit Hochgeschwindigkeitskamera



Aufnahmen der Wanderung des Lichtbogens entlang einer dreiphasigen Sammelschienenanordnung

Lichtbogenversuche am NARC

Das große Interesse an der Untersuchung von Störlichtbögen am NARC wurde auch in diesem Jahr anhand der hohen Anzahl von über 300 Störlichtbogenversuchen deutlich, die zusammen mit einer Vielzahl an Partnern aus Forschung, Entwicklung, Industrie, Handwerk und Verbänden durchgeführt wurden. Daran zeigt sich, dass gemeinsam an einer sicheren Energieversorgung gearbeitet wird.

Preise und Auszeichnungen

Zweiter Platz des Best Academic Poster Award beim Schutz- und Leittechnik Tutorial am 22.06.2022

Das 2-tägige FNN/ETG-Tutorial „Schutz- und Leittechnik“ fand nach längerer pandemiebedingter Pause in diesem Jahr am 21./22.06.2022 in Berlin statt.

Das IEEH hat sich mit vier Postern an der Konferenz beteiligt:

1. Modellierung von sekundären Störlichtbögen
2. Herausforderungen und Schutzkonzepte für Netze mit hohem Anteil leistungselektronischer Einspeiser
3. Herausforderungen an den Schutz von Elektrolyseanlagen
4. Transmission Lines Protection using Digital Morphologic Filter of Fault-generated Highfrequency Transient Signals

Das eingereichte Poster mit dem Titel „Modellierung von sekundären Störlichtbögen“ wurde am ersten Veranstaltungsabend ausführlich mit den Teilnehmenden diskutiert. Dargestellt wird ein neues Hybridmodell zur Modellierung des transienten Brennverhaltens sekundärer Störlichtbögen. Das Poster konnte überzeugen und wurde mit dem zweiten Platz des Best academic Poster Award gewürdigt. Die Autoren Carlo Liebermann und Moritz Meinck (Vierter und fünfter von Links) haben den Preis entgegen genommen.



Moderatoren und Gewinner des Best Academic Poster Award

Foto: Thomas Eicke

Best Paper Award bei der PESS & PELSS 2022 am 04.11.2022

Die Fachkonferenz PESS&PELSS fand vom 02.11. bis 04.11. im Fraunhofer IEE in Kassel statt. Das IEEH hat sich in Kooperation mit der Professur für Leistungselektronik mit einem Paper an der Konferenz beteiligt. Das eingereichte Paper mit dem Titel „Current Limiting of Virtual Synchronous Machines on Unbalanced Faults Considering Grid Protection“ wurde in der Session „Realtime Simulation, Testing and Protecting“ präsentiert. Darin wird der Einfluss der Strombegrenzung netzbildender Stromrichter im Fehlerfall auf konventionelle Distanzschutzalgorithmen dargestellt. Das eingereichte Paper konnte überzeugen und wurde mit dem Best Paper Award gewürdigt. Die anwesenden Autoren Carlo Liebermann, Lasse Gnärig und Ricardo Herrmann haben den Preis entgegengenommen.



Gewinner der Best Paper- und Best Presentation Awards
(vlnr): Manuel Galler, Benedikt Hönle, Ricardo Herrmann, Lasse Gnärig, Carlo Liebermann

Foto: Fraunhofer IEE

IEEE Best Master Thesis Award 2021

Jährlich schreibt das IEEE PES German Chapter den Preis „Best Master Thesis Award“ zur Würdigung herausragender Master- und Diplomarbeiten im Bereich der elektrischen Energietechnik, insbesondere der elektrischen Energieversorgung und Hochspannungstechnik aus. Neben einer sehr guten Abschlussarbeit muss das gesamte Studium mit dem Prädikat „sehr gut“ bewertet sein.

Die Diplomarbeit „Untersuchen der Stromdichteverteilung von Steck- und Gleitverbindungen in Drehstromsystemen“ von Michelle Pomsel, Mitarbeiterin an der Professur für Hochspannungs- und Hochstromtechnik wurde für das Jahr 2022 mit dem IEEE Best Master Thesis Award ausgezeichnet. Die Preisübergabe erfolgte im Rahmen des IEEE Workshops „Flexibilisierung des Energiesystems“ am 01.12.2022 in Magdeburg. Während des Workshops wurde ein kurzer Vortrag über die Inhalte der Diplomarbeit präsentiert.

Young Investigator Award auf der 67th IEEE Holm Conference 2022

Im Rahmen der jährlichen IEEE Holm Conference on Electrical Contacts wird der Paul and Dee-Dee Slade Young Investigator Award verliehen. Die Arbeitsgruppe „Elektrische Kontakte und Verbindungen“ nahm auch in diesem Jahr wieder an der international renommierten Konferenz in Tampa, Florida, USA teil.

Der Herausgeber des Fachbuchs, Paul G. Slade, „Electrical Contacts“ stiftet hierfür den „Young Investigator Award“. Ziel des Paul and Dee-Dee Slade Young Investigator Award ist es, herausragende Leistungen junger Forscher:innen auf dem Gebiet der elektrischen Kontakte zu würdigen und junge Ingenieur:innen für den Einstieg in dieses Gebiet zu gewinnen.

In diesem Jahr wurden fünf Kandidatinnen und Kandidaten nominiert, darunter eine Kandidatin vom IEEH. Frau Dipl.-Ing. Michelle Pomsel konnte mit ihrer Veröffentlichung „Influence of the Degree of Freedom in Normative Test Conditions on the Short-Circuit Behavior of Power Plug-In Connectors“ den Preis wieder einmal nach Dresden holen. In den letzten elf Jahren wurde dieser Preis viermal an die TU Dresden und dreimal an die Forschungsgruppe „Elektrische Kontakte und Verbindungen“ vergeben. Wir freuen uns über die internationale Wahrnehmung der jahrentlangten Erfahrung der Forschungsgruppe auf diesem Gebiet.



Nach der Preisübergabe beim Conference Lunch (vlnr.): T. Kufner, M. Pomsel, S. Schlegel

Foto: Stephan Schlegel

Promotionen



Thomas Götz, Dr.-Ing.

**Teilentladungsverhalten von
Gas-Feststoff-Isoliersystemen unter
Gleichspannungsbelastung**

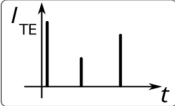
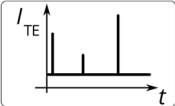
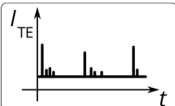
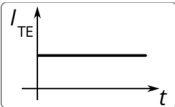
Gefördert durch:
DFG Deutsche
Forschungsgemeinschaft
und
 **Hitachi Energy**

„Das kompakte Design von gasisolierten Systemen und die Unabhängigkeit gegenüber Umgebungsbedingungen führt zu einer idealen Eignung des Betriebsmittels für den Einsatz in modernen Energieversorgungssystemen. Ein Betrieb der Anlagen unter Gleichspannungsbelastung ist dabei aufgrund der zunehmenden räumlichen Distanz zwischen Erzeugungs- und Verbrauchszentren unumgänglich. Der sichere Betrieb über die geplante Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten ist nur mit einer genauen Teilentladungsdiagnose (TE-Diagnose), welche eine sensitive Messung und zweifelsfreie Interpretation der Ergebnisse beinhaltet, möglich. Dabei ist zu beachten, dass die von Wechselspannungsanwendungen bekannten physikalischen Zusammenhänge der Entladungsprozesse und des Einflusses von dielektrischen Grenzflächen aufgrund der veränderten Belastung mit einem zeitlich konstanten elektrischen Feld und der damit einhergehenden Raum- und Oberflächenladungsakkumulation nicht direkt übernommen werden können.

Ziel dieser Arbeit ist daher die Entladungsprozesse an Defekten mit und ohne dielektrischer Grenzfläche in gasisolierten Gleichspannungssystemen zu analysieren und damit einen Beitrag für die sichere Interpretation von Teilentladungsmessungen zu leisten. Auch werden bekannte elektrische und neuartige optische Messmethoden hinsichtlich ihrer Möglichkeiten und Grenzen beim Einsatz unter Gleichspannungsbelastung untersucht. Für die experimentellen Arbeiten an drei verschiedenen Störstellen wird das schwach inhomogene Isoliersystem der Anlagen in drei Modellanordnungen nachgebildet. Die Untersuchung der ablaufenden Entladungsprozesse wird durch eine direkte Messung des Teilentladungsstroms ermöglicht. Dabei wird zwischen impulsbehafteten und impulslosen Anteilen unterschieden.

Infolge von Montagefehlern oder unzureichender Materialqualität können feste, metallische Störstellen im Isoliersystem entstehen. Die experimentell betrachteten Abhängigkeiten der Entladungsprozesse von der Störstellenpolarität, dem Isoliergasdruck und der Spannungsbelastung erlauben eine Klassifizierung von vier verschiedenen Entladungsarten (Tabelle 1). Zusätzlich zu den Untersuchungen im derzeit am häufigsten verwendeten Isoliergas Schwefelhexafluorid konnte ein Vergleich der Ergebnisse mit der klimafreundlichen alternativen synthetischen Luft die Gemeinsamkeiten und Unterschiede bei Entladungen an festen Störstellen aufzeigen. Dabei ist insbesondere die signifikant veränderte Polaritätsabhängigkeit hervorzuheben.

Tabelle 1: Klassifizierung der ermittelten TE-Arten in Schwefelhexafluorid und deren Auftreten im untersuchten Parameterbereich in Abhängigkeit der Polarität der Störstelle, der anliegenden Gleichspannung und des Isoliergasdrucks (U_i ... Einsetzspannung)

Beschreibung	Schematische Darstellung	Auftreten		
		Polarität	Spannung	Gasdruck
TE-Impulse		+	$\approx U_i$	(0,1 ... 0,7) MPa
Impulsloser TE-Strom mit überlagerten TE-Impulsen		+/-	$\geq U_i$	(0,1...0,7) MPa
Impulsloser TE-Strom mit überlagerten TE-Impulsen und kleinen Folgeimpulsen		+	$\geq 2 U_i$ $\geq U_i$	(0,1...0,5 MPa) 0,7 MPa
Impulsloser TE-Strom		-	$\geq 2,5 U_i$	0,1 MPa

Der Kontakt von metallischen Partikeln mit der Feststoffisolierung kann zur Anlagerung des zuvor freibeweglichen, metallischen Defektes an der dielektrischen Grenzfläche führen. Die Ansammlung von Oberflächenladungen auf dem Feststoff beeinflusst dabei insbesondere den Entladungseinsatz. Aufgrund des zur festen metallischen Störstelle ohne Grenzfläche vergleichbaren Entladungsverhaltens im stationären Zustand ist eine Unterscheidung der Defekte anhand von Impulswiederholraten und Amplituden herausfordernd.

Eine Besonderheit bei Gleichspannungsbelastung sind Entladungen, welche auf einer Gas-Feststoff-Quergrenzfläche an beschichteten Elektroden einsetzen können. Die Untersuchung der Ursachen für das Auftreten dieser Entladungen, die elektrischen und optischen Charakteristika der ablaufenden Prozesse und Strategien für die Vermeidung werden untersucht.

Aus den Ergebnissen werden Prüfeempfehlungen für die Teilentladungsdiagnose von gas-isolierten Gleichspannungssystemen abgeleitet. Diese sind wesentlicher Bestandteil für einen zukünftigen Einsatz gasisolierter Gleichspannungssysteme in einem leistungsfähigen Elektroenergiesystem mit hoher Versorgungszuverlässigkeit.“ [1]

[1] T. Götz: "Teilentladungsverhalten von Gas-Feststoff-Isoliernsystemen unter Gleichspannungsbelastung", Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden, 2022. DOI: 10.25368/2022.133

**Friedemann Möller, Dipl.-Ing.****Analyse der Auswirkungen von unsymmetrisch betriebenen Kundenanlagen auf die Strom- und Spannungsunsymmetrie in öffentlichen Niederspannungsnetzen am Beispiel von Elektrofahrzeugen und Photovoltaikanlagen**

Die weltweite Verknappung fossiler Energieträger sowie die Ziele zur Reduzierung des anthropogenen CO₂-Ausstoßes zur Eindämmung der globalen Erwärmung führen zu einer Vielzahl an Veränderungen im Energiesektor. So ist neben dem Ausbau und der Integration von erneuerbaren Energien eine Steigerung der Effizienz aller Energiewandlungsprozesse sowie die verstärkte Nutzung der Elektromobilität zu erwarten. Da Elektroenergie mit einem hohen Wirkungsgrad in eine Vielzahl anderer Energieformen umgewandelt werden kann, ist damit zu rechnen, dass dieser Energieform in Zukunft eine Schlüsselrolle zur Erreichung der hoch gesteckten Ziele zukommt und eine verstärkte Kopplung der Energiesektoren Strom, Wärme und Mobilität angestrebt wird.

Die zu erwartende Sektorenkopplung wird auf die verschiedenen Netzebenen des Elektroenergienetzes unterschiedliche Veränderungen hervorrufen. In Hinblick auf die Niederspannungsnetze in Deutschland ist mit einer verstärkten Zunahme an Erzeugungsanlagen, insbesondere Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) kleiner Leistung zu rechnen. Eine Kopplung zum Wärmesektor ist über Wärmepumpen und Klimaanlage und eine Kopplung zum Mobilitätssektor durch Elektromobilität (EV engl. Electric Vehicle) wahrscheinlich.

Die Vielzahl dieser Anlagen wird unsymmetrisch mit hoher Betriebsdauer und -strömen in Niederspannungsnetzen betrieben und führt neben der stärkeren Belastung der Betriebsmittel und des Spannungsbandes zu einer Erhöhung der Spannungsunsymmetrie.

Neben der Klassifizierung der Unsymmetrie, der theoretischen Betrachtung der Einflusskenngrößen auf die Unsymmetrie wird in der Arbeit die Beeinflussung unsymmetrisch betriebener Kundenanlagen anhand von Niederspannungsnetzsimulationen bei verschiedener Durchdringung von Elektrofahrzeugen und Photovoltaikanlagen untersucht. Dazu werden anhand von Labor- und Netzmessungen probabilistische Lastmodelle für Haushalte, PV-Anlagen und EV entwickelt, welche die unsymmetrische Betriebsweise über einen Tag berücksichtigen. Die Auswirkungen auf die Unsymmetrie werden anhand des Verhältnisses zwischen Gegen- zu Mitsystemspannung und basierend auf den unsymmetrischen Leistungsanteilen beschrieben.

Neben der Analyse der Auswirkungen der unsymmetrisch betriebenen Kundenanlagen auf die erwähnten Kenngrößen werden mögliche Maßnahmen zur Reduzierung des Einflusses der Unsymmetrie vorgestellt und durch Simulationen geprüft.

Die Ergebnisse zeigen einen signifikanten Einfluss von PV-Anlagen und EV auf alle erwähnten Bewertungskenngrößen. Bei zufälliger Wahl des Außenleiters, über den die Kundenanlagen betrieben werden, zeigt sich, dass es eher zu Verletzungen des Spannungsbandes und des zulässigen Gesamtstöreintrags der Spannungsunsymmetrie kommt als zu Betriebsmittelüberlastungen.

Als Maßnahmen zur Reduzierung der Spannungsunsymmetrie empfiehlt sich neben einer symmetrisch zyklischen Aufteilung der unsymmetrisch betriebenen Kundenanlagen (besonders wirkungsvoll für PV-Anlagen) eine Reduzierung des unsymmetrischen Betriebsstroms und die Förderung des 3-phasigen Betriebs der Kundenanlagen. Eine Wahl des Außenleiters bspw. zu Beginn eines Ladevorgangs zur Reduzierung der Spannungsunsymmetrie kann unter Umständen zu einer Erhöhung anderer Kenngrößen (z. B. Betriebsmittelbelastung) führen und ist nur nach vorangegangener Prüfung eingeschränkt zu empfehlen. Zur Vermeidung von Spannungsbandverletzungen, bei zunehmender Durchdringung der Netze mit PV-Anlagen und EV, zeigt sich eine Regeleinheit in Transformatornähe wie bspw. ein regelbarer Ortsnetztransformator als besonders wirkungsvoll.

Anhand der durchgeführten Betrachtungen und Simulationen wird ein Niederspannungsäquivalent abgeleitet. Mit diesem können Profile für die unsymmetrischen Leistungsanteile bestimmt werden, mit denen die Sternpunktbelastung und der Einfluss auf die Unsymmetrie im übergeordneten Netz abgeschätzt werden kann. Ein Vergleich der 95%-Quantile zwischen Simulationsergebnissen und Niederspannungsäquivalent ist in Bild 1 dargestellt.

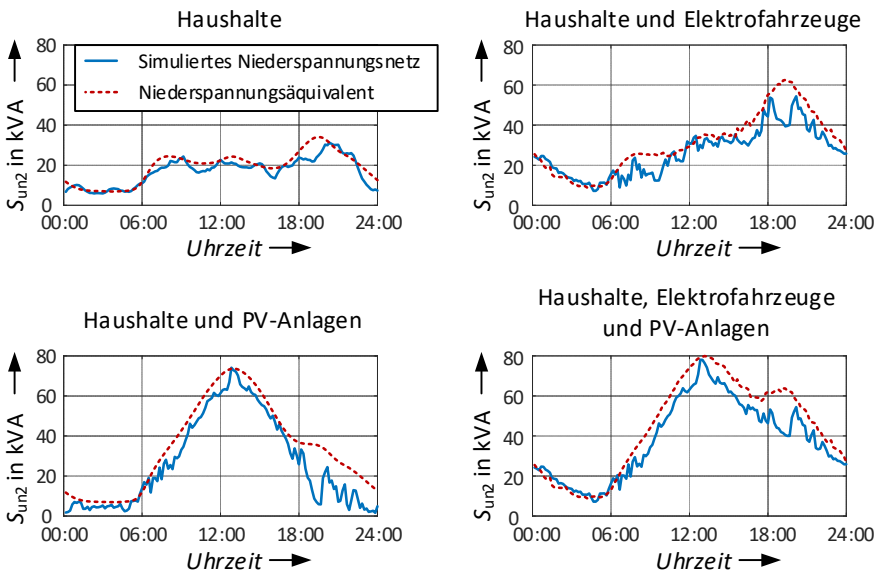


Bild 1: Vergleich der 95%-Quantile des Niederspannungsäquivalents und der Simulationsergebnisse

Die Ergebnisse der Arbeit dienen als Grundlage für Planungsansätze in Niederspannungsnetzen in denen die Unsymmetrie berücksichtigt wird, sie zeigen Maßnahmen zur Einschränkung der Unsymmetrie auf und liefern ein Werkzeug zur Abschätzung des Einflusses untergeordneter Niederspannungsnetze auf die Unsymmetrie in Mittelspannungsnetzen.



Franck Stephane Djuimeni Poudeu,
Dipl.-Ing.

**Langzeitverhalten stromführender
Schraubenverbindungen mit
Stromschienen kleiner Dicke bei
wechselnden Umgebungsbedingungen**

Projekt gefördert durch:
Daimler AG (Industrie-
promotion)

Stromführende Schraubenverbindungen werden verwendet, um elektrische Komponenten im Automotiv-Bereich sowie im Bereich der Elektroenergietechnik aufgrund der Austauschbarkeit und der Reparaturmöglichkeit zu verbinden. Diese Verbindungen werden dabei insbesondere im Automotive-Bereich permanent mit statischen bzw. wechselnden Umweltbedingungen belastet. Abhängig von den elektrothermischen und den mechanischen Anforderungen an die elektrischen Komponenten kommen meistens Leiter mit einer Dicke im Bereich von (1...5) mm zum Einsatz. Bei diesen geringen Dicken der Leiter können wechselnde Belastungen zu einer unzulässigen Erhöhung des Verbindungswiderstandes führen. Für die Auslegung von langzeitstabilen stromführenden Schraubenverbindungen müssen daher die Konstruktions- und Montageparameter sowie die Leiter- und Beschichtungswerkstoffe abhängig von den erwarteten Umweltbelastungen aufeinander abgestimmt werden. In dieser Arbeit wurde das Kontakt- und Langzeitverhalten stromführender Schraubenverbindungen abhängig von der Leiter- und Schraubengeometrie sowie vom Leiter- und Beschichtungswerkstoff untersucht. Die Ergebnisse wurden mit früheren Arbeiten über Schraubenverbindungen mit deutlich größerer Dicke der Leiter verglichen und daraus allgemeingültige Mindestflächenpressungen für ein gutes Kontaktverhalten hergeleitet. In Bild 1 ist das Kontaktverhalten von Verbindungen mit vorbehandelten Leitern aus Kupfer und Aluminium abhängig von der Dicke des Leiters dargestellt.

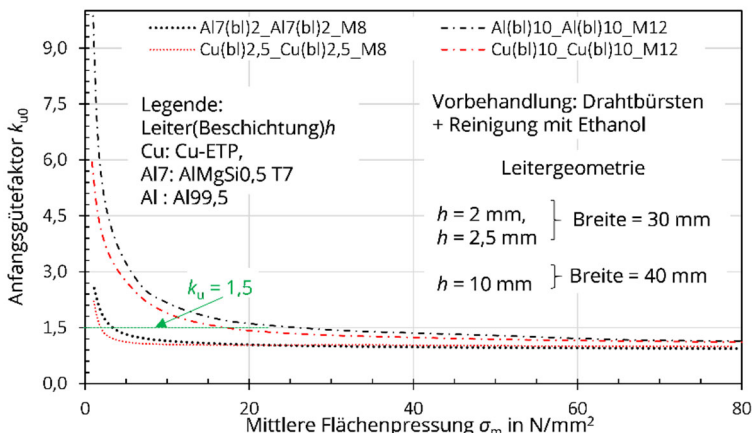


Bild 1: Kontaktverhalten von Schraubenverbindungen mit blanken Leitern kleinerer ($h \leq 2,5$ mm) und größerer ($h = 10$ mm [1]) Dicke des Leiters

Es konnte gezeigt werden, dass der Leiterwerkstoff bei richtiger Vorbehandlung keinen signifikanten Einfluss auf das Kontaktverhalten hat. Außerdem ist im Bereich geringer Flächenpressung zu sehen, dass der Anfangswert des Gütefaktors aufgrund der geringeren lokalen mechanischen Spannungen zwischen den Leitern mit der Dicke des Leiters leicht zunimmt. Im Bereich hoher Flächenpressungen ($\geq 85 \text{ N/mm}^2$) wird der Einfluss der lokalen mechanischen Spannung deutlich geringer und die Dicke des Leiters ist vernachlässigbar. Der Einfluss der Temperatur auf das Werkstoffverhalten von Aluminium und Kupfer wurde mit der Grenzflächenpressung und der Härte bewertet. Für ausgewählte Schraubenverbindungen wurde der Einfluss der Temperatur auf das Vorspannkraft- und Langzeitverhalten untersucht und damit die werkstoffabhängige Grenztemperatur bestimmt. Abhängig von der Montagevorspannkraft, der Leiter- und Schraubengeometrie wurde der Einfluss des Temperaturschocks und von Vibrationen auf das Langzeitverhalten untersucht. Daraus wurden die oberflächenspezifischen Mindestflächenpressungen für ein gutes Langzeitverhalten hergeleitet.

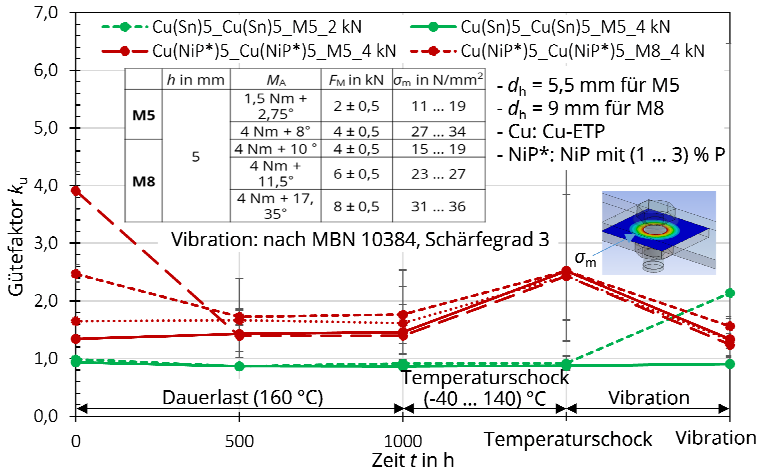


Bild 2: Einfluss der Umweltbelastungen auf das Langzeitverhalten von Schraubenverbindungen abhängig von der Montagevorspannkraft

In Bild 2 sind die Einflüsse der Umweltbelastungen auf das Langzeitverhalten der Schraubenverbindungen zu sehen. Diese Einflüsse hängen stark von der Werkstoffpaarung und der Montagevorspannkraft ab. Der Gütefaktor von Schraubenverbindungen, mit geringerer mittlerer Flächenpressung nach der Montage, erhöht sich bei Temperaturschock oder Vibrationen deutlich. Ist die mittlere Flächenpressung abhängig von der Werkstoffpaarung ausreichend hoch, sind die Schraubenverbindungen stabil. Diese gewonnenen Erkenntnisse bilden Anhaltspunkte für die konstruktive Auslegung, die Montage und das Prüfen stromführender Schraubenverbindungen insbesondere im Automotive-Bereich.

[1] S. Schlegel: Stromführende Verbindungen und Leiterwerkstoffe der Elektroenergietechnik. Habilitation, TU Dresden, 2019.



Karsten Wenzlaff, Dr.-Ing.

**Verfahren zur Detektion von
Störlichtbögen in stromstarken
Niederspannungsanlagen**

Als elektrische Fehler treten Störlichtbögen oft im Zusammenhang mit Kurzschlüssen auf und unterscheiden sich in serielle und parallele Störlichtbögen. Im Vergleich zum seriellen Störlichtbogen, dessen Fehlerstrom im Bereich des Laststroms liegt, kann der Fehlerstrom des parallelen Störlichtbogens in Niederspannungsnetzen etwa 50 % des prospektiven Kurzschlussstroms betragen. Dieser wird als stromstarker Störlichtbogen bezeichnet [1].

Besonders in hochenergetischen Bereichen der Industrie können beim Auftreten eines stromstarken Störlichtbogens in einer Schalt- und Verteilanlage hohe thermische Energien freigesetzt werden, sodass es innerhalb weniger Millisekunden zu einer vollständigen Zerstörung der Anlage kommen kann. Klassische Schutzsysteme, die üblicherweise in der Niederspannung auf einer Überstrom-Zeit-Charakteristik basieren, können meist keinen ausreichenden Schutz bieten.

Der Anwendung spezieller Störlichtbogenschutzsysteme ist bisher oft mit einem erhöhten Installationsaufwand verbunden, da die Erkennung von Störlichtbögen meist auf optischen Sensoren basiert [1]. Zukünftig ermöglicht eine neu entwickelte Klasse numerischer Algorithmen das Erkennen von Störlichtbögen durch eine zeitaufgelöste, zentrale Auswertung von Strom und Spannung. Diese Zeitverläufe zeigen für eine Fehlerschleife mit brennendem Störlichtbogen signifikante Kriterien, die sich für die Erkennung von Störlichtbögen eignen.

Entwicklung numerischer Detektionsalgorithmen

Distanzschutzalgorithmen haben sich in der Elektroenergietechnik für die Fehlerkennung bewährt. Die Erweiterung der Ansatzdifferentialgleichung 1. Ordnung ermöglicht die Berechnung der Lichtbogenspannung in einer Fehlerschleife und lässt sich mit differenzierenden oder integrierenden Lösungsverfahren berechnen.

Mit einem integrierenden Lösungsverfahren kann mit dem I-RLs-Algorithmus die Lichtbogenspannung U_{LB} nach Auflösung der vollständigen Ansatzgleichung

$$\int u_m(t) dt = R_{BM} \int i_m(t) dt + L_{BM} \int \frac{di_m(t)}{dt} dt + U_{LB} \int \operatorname{sgn}(i_m(t)) dt \quad (1)$$

berechnet werden. Die Auswertung der Lichtbogenspannung und somit die Erkennung des Störlichtbogens kann durch einen Schwellwertvergleich erfolgen.

Für die Erkennung hochfrequenter Änderungen im Signalverlauf, wie sie im Spannungsverlauf von stromstarken Störlichtbögen auftreten, eignen sich Signalverlaufsalgorithmen, die auf einer Wavelet-Transformation basieren. Der W-RUS-Algorithmus berechnet als Signalverlaufsalgorithmus einen äquivalenten Spannungssprung im Zeitverlauf einer Spannung:

$$\Delta U_{W-RU}^a(v) = \frac{2}{a} \left(\sum_{k=v-\frac{a}{2}+1}^v u_m(k) - \sum_{k=v-a+1}^{v-\frac{a}{2}} u_m(k) \right) \quad (2)$$

Dieses Kriterium tritt bei einem stromstarken Störlichtbogen zum Zeitpunkt der Lichtbogenzündung und in jedem weiteren Stromnulldurchgang auf und kann somit zur Erkennung von Störlichtbögen genutzt werden.

Bewertung von Detektionsverfahren durch Auswertung der Detektionszeit

Als Bezugsgröße für die Berechnung der Detektionszeit eignet sich ein Referenzzündzeitpunkt t_{RZ} , der als Zeitpunkt des vollständig durchgezündeten Lichtbogenkanals zwischen zwei Elektroden definiert ist. Die Kriterien lassen sich im Strom- und Spannungsverlauf mit einer zeitsimultanen, optischen Aufzeichnung nachweisen.

Die Einstellparameter der Detektionsalgorithmen beeinflussen die Detektionszeit und je nach Wahl der Einstellparameter lassen sich mit den neuen Detektionsverfahren vergleichbare Detektionszeiten wie mit optischen Detektionssystemen erreichen, die etwa 1 ms für die Erkennung eines Störlichtbogens benötigen.

Mit dem I-RLs-Detektionsverfahren wird durch die Berechnung der Lichtbogenspannung ein sehr kontinuierliches Detektionssignal ausgewertet. So können etwa 80 % der Störlichtbögen zu t_{RZ} und etwa 97 % der Störlichtbögen 1 ms nach t_{RZ} mit dem Verfahren erkannt werden. Das W-RUs-Detektionsverfahren ist ein sehr schnelles Verfahren zur Störlichtbogenerkennung, da es Störlichtbögen bereits während der Durchzündung der Lichtbogenstrecke erkennt. So können etwa 90 % der Störlichtbögen 0,2 ms vor t_{RZ} und 95 % der Störlichtbögen 1 ms nach t_{RZ} mit dem Verfahren erkannt werden.

Eignung einer neuen Technologie zur Störlichtbogenerkennung

Für eine sichere Störlichtbogenerkennung bedarf es einer Unterscheidung zwischen Betriebszustand und dem Fehlerzustand der Anlage. Ein zusätzliches Überstromfreigabeverfahren kann eine Unterscheidung ermöglichen. Das I-RLs- und W-RUs-Detektionsverfahren lassen sich durch ein zusätzliches Überstromfreigabeverfahren ergänzen und gemeinsam in eine vollständige Störlichtbogenschutzfunktion implementieren.

- [1] K. Wenzlaff, R. Herrmann, M. Bruhns, P. Schegner and M. Anheuser, "ELECTRICAL AND NON ELECTRICAL CHARACTERISTICS FOR THE FAST DETECTION OF HIGH CURRENT FREE-BURNING ARCS", Plasma Physics and Technology 9(2): 6–11, 2022.

Kooperationen

Kooperationen National

Wissenschaftskooperationen

Energieforschungsinstitut Dresden e.V.
Energy Saxony e.V.
fem Forschungsinstitut
FGW - Forschungsgesellschaft Wind e.V.
Fraunhofer IWES
Fraunhofer IEE
Fraunhofer ISE
Fraunhofer IKTS
Fraunhofer IWS
Fraunhofer IVV
Fraunhofer EMFT
Friedr.-Alex.-Univ. Erlangen-Nürnberg
Leibniz Universität Hannover
Hochschule Zittau/Görlitz (FH)
Hochschule Mittweida
HTW Dresden
HTW Saarland, Saarbrücken
HTWK Leipzig

INP Greifswald e.V.
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Physikalisch-Technische Bundesanstalt - PTB
RWTH Aachen
Technische Universität Berlin
Technische Universität Braunschweig
Technische Universität Chemnitz
Technische Universität Darmstadt
Technische Universität Dortmund
Technische Universität Freiberg
Technische Universität Ilmenau
Technische Universität München
Universität Bremen
Universität Duisburg-Essen
Universität Kassel
Universität Rostock
Universität Stuttgart

Industriekooperationen

50Hertz Transmission GmbH
Acelor Mittal Europe
Amprion GmbH
Avacon AG
A.Eberle GmbH & Co.KG
Bayernwerk Netz GmbH
BBC Cellpack GmbH
BMW AG
bnNETZE GmbH
BSD Bildungs- und Servicezentrum GmbH
Cablex-DE GmbH
Daimler AG

Dehn & Söhne GmbH
DigSILENT GmbH
DNV GL Energy
Dr.-Ing. Max Schlötter GmbH & Co. KG
E.ON Avacon
E.ON edis AG
Emacons consulting GmbH
EnBW Energie Baden-Württemberg AG
EnBW Regional AG
engstKABEL GmbH & Co. KG
envia Mitteldeutsche Energie AG
F&S PROZESSAUTOMATION GmbH

Framatome GmbH
Forum Netztechnik Netzbetrieb im VDE
FRAKO Kondensatoren- und Anlagenbau
GmbH

GAHL Hochleistungsbau GmbH
GEIRI (Global Energy Interconnection
Research Institute Europe GmbH)
Getriebebau Nord GmbH & Co. KG

GWT-TUD GmbH
Infineon Technologies AG
Haefely Test AG
Henze BNP AG
HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH
InfraTec GmbH
LAPP Insulator GmbH
LTB Leitungsbau GmbH

Maschinenfabrik Reinhausen GmbH
MITNETZ Strom GmbH
Moosbach & Kanne GmbH
Netzdienste Rhein/Main GmbH
NH-HH-Recycling e.V.
ohv diagnostic
Omicron electronics GmbH
Omexom GmbH
Richard Bergner Holding GmbH & Co. KG

RITZ Instrument Transformers 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
Scheidt GmbH & Co KG

Schneider Textilveredlung GmbH
Schneider Electric GmbH

Siba GmbH
Siemens AG
Siemens Energy GmbH
SMA Technologie GmbH
GBS Elektronik GmbH
Südkabel GmbH

TE Connectivity Germany GmbH
teckentrup GmbH & Co.KG

TEN - Thüringer Energienetze

TenneT TSO GmbH
TENOWO GmbH
TransnetBW GmbH

Vattenfall Europe Distribution GmbH
VEM Sachsenwerk GmbH

Thomas Werner Industrielle Elektronik eKfm
Weitkowitz GmbH

WRD Wobben Research and Development
GmbH

ZF Friedrichshafen AG

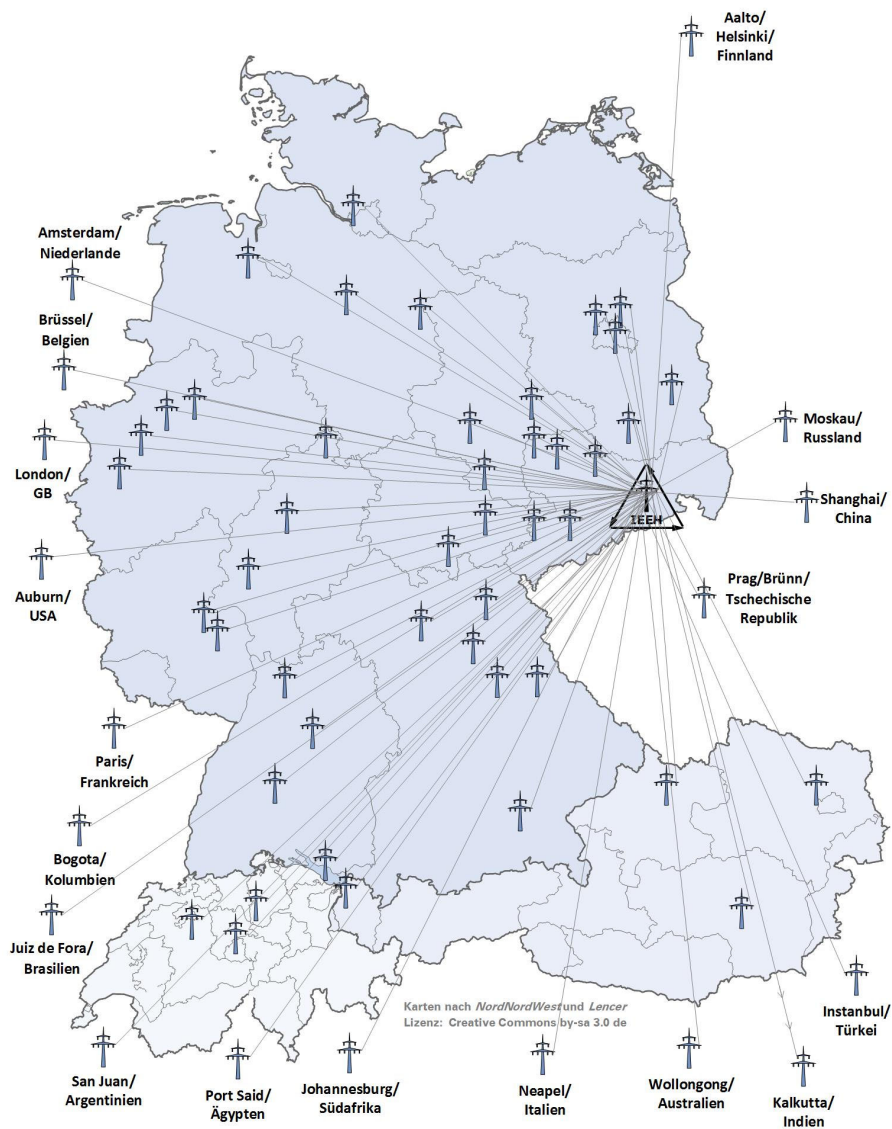
Kooperationen International

Wissenschaftskooperationen

Aalto University/Finnland	South China University of Technology, China
Auburn University, USA	Suez Canal University-Faculty of Engineering- Electrical Department, Ägypten
AME s.r.l.	Technische Universität Graz/Österreich
Brno University, Tschechische Republik	Technische Universität Wien/Österreich
CEN SIPAM-Centro Gestor e Operacional do Sistema de Protecção da Amazonia, Brasilien	TAU Tampereen korkeakoulusäätiö sr
DAMASCUS UNIVERSITY	Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
Federal University of Juiz de Fora, Brasilien	TUBITAK Türkei
FFII Fundación para el Fomento de la Inno- vación	UFPA, Brasilien
GEIRI, China	University of Edinburgh
ETH Zürich	
FFII	
Helsinki University of Technology	Universidad Nacional de San Juan, Argentinien
India Institute of Technology Madras, Indien	University of Wollongong, Australia
INRIM Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica	Università degli Studi della Campania Luigi Vanvitelli, Naples, Italien
Kings College London	Universidad Nacional de Colombia, Kolumbien
Luleå University of Technology, Schweden	University of Canterbury, Neuseeland
LNE Laboratoire national de métrologie d'essais METAS, Bern, Schweiz	University of the Basque Country, Spanien
MIKES, Finnland	University of Liberec, Tschechische Republik
North West University, Südafrika	University of Stellenbosch, Südafrika
NPL, London, UK	Wroclaw University of Technology/Polen
Port Said University, Ägypten	Yildiz Teknik Üniversitesi
RISE Research Institutes of Sweden AB	

Industriekooperationen

ALSTOM Grid, Frankreich	Hitachi Energy, Schweiz
ASBESCO PVT. LTD., Indien	Infrabel AG Belgien
Camille Bauer Metrawatt AG, Schweiz	Österreichs Energie
Energie AG Oberösterreich	ProRail N.V., Niederlande
EWZ - Elektrizitätswerk der Stadt Zürich	Sprecher Automation GmbH
Pfiffner Messwandler AG, Schweiz	Stäubli Electrical Connectors AG, Schweiz
Hightechzentrum Aargau	



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 *Energietechnische Komponenten*

Dipl.-Ing. Sebastian Krahmer

VDE Dresden Arbeitskreis: *Verteilungsnetze*

ETG/GMA Fachausschuss: *V2.1/FA 7.16 Netzregelung und Systemführung* (Gastmitglied)

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 characteristic of voltage measurement systems*

IEEE PES Working Group on Harmonics (IEEE 519)

IEEE TF on harmonic modelling

Dipl.-Ing. Marta Sophia Potyka

Jungingenieurreferentin VDE Dresden

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*

Lehrstuhl Hochspannungs- und Hochstromtechnik

Dr.-Ing. Thomas Götz

CIGRE WG D1.63 *Partial discharge detection under DC voltage stress*

Dr.-Ing. Christian Hildmann

IEC TC 11 JWG 13 *Overhead lines*

DKE AK 421.0.5 *Komponenten* (Gast)

Dr.-Ing. Toni Israel

CIGRE WG D1.54 *Principles to measure the AC and DC resistance of conductors*

Dipl.-Ing. Thomas Linde

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

PD Dr.-Ing. habil. Stephan Schlegel

DKE AK 411.3.2 *Verbinder*

DKE AK 411.3.1 *Hochspannungsgarnituren* (Gast)

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.

Das 22. Treffen zum Dresdner Kreis fand in diesem Jahr am 15. und 16.03.2022 an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg statt. Nach der Begrüßung durch Herrn Professor Wolter wurden am ersten Tag insgesamt acht aktuelle Forschungsthemen vorgestellt. Am zweiten Tag kamen die Teilnehmer zur LENA-Challenge zusammen, in der Teams zu je drei Personen das Stromnetz in der Leitwarte des LENA möglichst lange optimal führen sollten. Der Wettkampf brachte folgende Ergebnisse hervor:



Teilnehmer:innen des „Dresdner Kreises“ an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Foto: Marc Gebhardt

Ergebnisse der LENA-Challenge

Platzierung	Teamname	Punktstand
1	Pi = 3	24837
2	404 Name not Found	24427
3	Die Netzretter	24321
4	BeESt	22189
5	State BeEStrider	21748
6	Schwarze Pumpe	17434

Die Teams „ $\pi = 3$ “ und „Die Netzretter“ haben den ersten sowie den dritten Platz erspielen können und wurden mit einem Pokal ausgezeichnet.



Erster Platz: Team „ $\pi = 3$ “

Foto: Marc Gebhardt



Dritter Platz: Team „Die Netzretter“

Foto: Marc Gebhardt

29. Kolloquium „Hochspannungs- und Anlagentechnik“ an der Hochschule Zittau/Görlitz vom 22. – 24.06.2022

Seit nun 29 Jahren treffen sich jährlich Assistent:innen, Mitarbeiter:innen und Professor:innen der technischen Universität Darmstadt, München, Ilmenau, Dresden und der Hochschule Zittau/Görlitz zum Kolloquium „Hochspannungs- und Anlagentechnik“. Die Zusammenkunft dient dem Austausch wissenschaftlicher Forschungsergebnisse und Themen in der Lehre und Hochschulpolitik, aber auch dem gegenseitigen Kennenlernen. Dabei gab es dank der tollen Organisation viele Möglichkeiten über spannende Themen zu diskutieren. Eine zentrale Rolle spielte dabei die Präsentation der aktuellen Forschungsschwerpunkte der Teilnehmer:innen in einer hochwertigen Vortrags- und Postersession. Themen zu den Schwerpunkten HVDC-Anlagen und -Komponenten, gasisolierten Systemen, thermische Modellierung und Kontaktverhalten unterschiedlicher Verbindungsverfahren und Materialien luden zu angeregten Diskussionen ein. Das fachliche Programm wurde durch eine Führung durch die Laborräumlichkeiten des Fachgebietes für Hochspannungstechnik an der Hochschule Zittau/Görlitz und eine Exkursion in das Braunkohlekraftwerk „Boxberg“ ergänzt. Neben der Besichtigung der Einrichtung wurde hier auch über die Rolle des Kraftwerks in der heutigen Zeit und zukünftige Innovations- und Entwicklungsmöglichkeiten des Standortes informiert.

Abwechslung zum fachlichen Programm schaffte die Besichtigung und mittelalterliche Führung durch die Burg und das Kloster von Oybin. Im Anschluss an die Führung durch die Burgruine bot die mittelalterliche Kulisse einen tollen Rahmen für individuelle Begegnungen und interessante Gespräche bei leckerem Essen.



Gruppenbild vor der Burgruine Oybin

Foto: Fachgebiet Hochspannungstechnik der Hochschule Zittau/Görlitz

Studentenexkursion zum Schutz- und Leittechnik Tutorial am 22.06.2022

Am 21./22.06.2022 fand das FNN/ETGTutorial „Schutz- und Leittechnik“ in Berlin statt. Die Veranstaltung zeichnet sich durch interessante fachspezifische Vorträge aus, die in Workshops vertieft und diskutiert werden können. In einer begleitenden Poster-Session hatten Hersteller, Netzbetreiber und wissenschaftliche Einrichtungen die Gelegenheit, ihre Forschungsaktivitäten der Fachöffentlichkeit zu präsentieren.

Es stand, wie in den letzten Jahren auch, der Einfluss der Energiewende auf die elektrischen Energieversorgungsnetze mit deren Konsequenzen für die Schutz- und Leittechnik im Vordergrund.

Aktuelle Themen aus den Gebieten der Schutz und Leittechnik sollten auch interessierten Studenten des Fachgebiets zugänglich gemacht werden. Die Finanzierung der Tagungsgebühren, der Übernachtungskosten und der Fahrtkosten wurde durch die beiden Hochschulen HTW und TU Dresden, den Verein Energieforschungsinstitut Dresden (efi e.V.) und den VDE Dresden e.V. übernommen.



Die Teilnehmer:innen der TU Dresden und der HTW Dresden

Foto: EW Medien

Assistentenfahrt der Professur für Hochspannungs- und Hochstromtechnik nach Minden, 19.08. - 21.08.2022

Endlich! Nach zwei Jahren „Corona-Pause“ konnte 2022 die Assistentenfahrt der Professur für Hochspannungs- und Hochstromtechnik wieder stattfinden. Bereits bei der letzten Fahrt in den Thüringer Wald (Jahresbericht 2019) wurde als Ziel das beschauliche Örtchen Minden in Ostwestfalen erkoren.

Gemütlich ging es am 19. August beim Spießbratengrillen auf dem Gelände des TV1860 Minden los, um sich von der doch recht langen Anreise zu erholen. Neben genügend Speis' und Trank sorgte dabei auch die ein oder andere sportliche Aktivität für die Unterhaltung aller Teilnehmer. Der nächste Tag startete zunächst mit eher unfreundlichen Wetteraussichten, sodass der erste Programmpunkt, eine Schlauchbootfahrt auf der Weser, im wahrsten Sinne des Wortes beinahe ins Wasser zu fallen drohte. Kurz vor dem Zuwasserlassen der Boot klarte es jedoch auf, sodass sich letzten Endes der eine oder die andere freiwillig ins kühle Nass begaben. So entschied sich ein Teil der Professur sogar am „1. Mindener Weserschwimmen“ teilzunehmen. Nach einer Stärkung im Restaurant „Die Knolle“ stand der letzte Programmpunkt des Samstags an: Eine Nachtwächterführung durch die Mindener Innenstadt. Diese gipfelte mit dem Erklimmen des Glockenturms von St. Martini und anschließendem Verköstigen des „Türmer-Alt“, gebraut vom Türmer höchstpersönlich. Auch am letzten Tag ging es noch einmal hoch hinaus. Eine Wanderung führte zum Kaiser-Wilhelm-Denkmal und dann auf dem Kamm des Wiehengebirges entlang bis zur Wittekindsburg, wo jeweils bei herrlichstem Sonnenschein eine wunderbare Aussicht bestaunt werden konnte. Mit dem Abschiedsmittagessen im Gasthaus „Zur alten Fähr“ ging schließlich ein ereignisreiches Wochenende zu Ende.



Schlauchboottour

Foto: IEEH

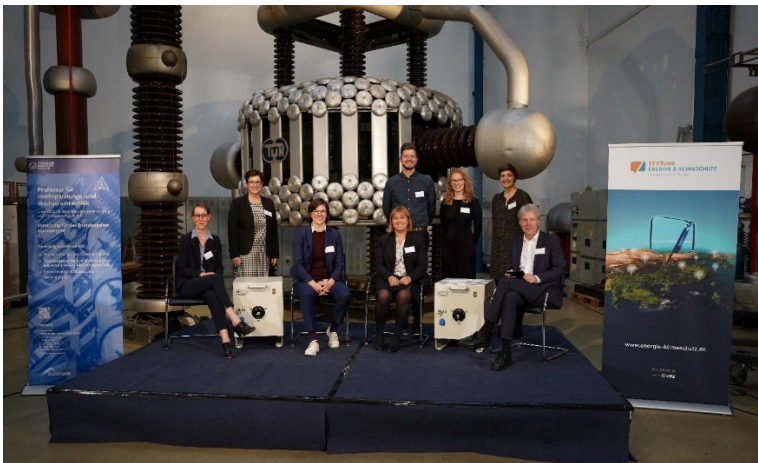


Teilnehmer vor dem Kaiser-Wilhelm-Denkmal

Foto: IEEH

Summer School „Connecting Female Scientists“ und Podiumsdiskussion – Energiespeichersysteme

Eine Podiumsdiskussion mit nur männlichen Teilnehmern? Die sozialen Medien halten auch dafür einen Begriff bereit: „manel“ - das „all-male panel“. Dass dies zur Vergangenheit gehört, konnte in der Podiumsdiskussion im Rahmen der Summer School „Connecting Female Scientists“ an der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik gezeigt werden. Die drei Expertinnen Dr. Julia Badede (ABO Wind GmbH), Dr. Constanze Adolf (Christ & Company) und Dr. Selma Lossau (Netze BW GmbH) diskutierten in der Hochspannungshalle der TU Dresden über die Potenziale und Beiträge verschiedener Energiespeichertechnologien im Kontext der Dekarbonisierung der Energiebereitstellung. Die Veranstaltung wurde vom Team der Professur für Hochspannungs- und Hochstromtechnik zusammen mit der Stiftung Energie & Klimaschutz organisiert und konnte neben 50 Gästen vor Ort auch mehr als 160 Teilnehmer:innen im Live-Stream begeistern.



Die Podiumsdiskussion zum Thema „Speicher – vom Potential zu realen Beitrag“ fand in der Hochspannungshalle an der TU Dresden statt.

V.l.n.r: Dr. Constanze Adolf (Christ & Company), Anke Wilhelm (Stiftung Energie & Klimaschutz), Dr. Julia Badede (ABO Wind GmbH), Dr. Selma Lossau (Netze BW GmbH), Thomas Linde, Lena Elspaß, Johanna Linke (IEEH, TU Dresden), Moderator Thomas Bade

Foto: Andreas Dowbysch

Die Podiumsdiskussion war Bestandteil des Programmes der Summer School „Connecting Female Scientists“, in der sich junge Wissenschaftlerinnen und Studentinnen aus Norwegen, Frankreich, Marokko und Deutschland vom 26. bis 30.09.2022 mit dem Thema Energiespeichersysteme beschäftigten. Das Team der Gleichstellungsarbeit der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik organisierte ein vielfältiges Programm rund um innovative Energiespeichertechnologien und deren Einfluss auf die Energiewende. Die

eingeladenen Referentinnen gaben Einblicke in ihre Fachgebiete, ihre Arbeitswelten und auch in ganz persönliche Aspekte ihres Werdegangs als Frau im immer noch männerdominierten MINT-Bereich. Dabei kamen alle Referentinnen immer wieder zu dem wichtigen Punkt der starken fachlichen Netzwerke in ihrer Karriere zu sprechen. Wie diese geknüpft und beibehalten werden, lernten die Teilnehmerinnen der Summer School von Dr. Franka Schröder, die in einem Workshop wichtige Strategien zum Netzwerken vermittelte. Ein weiteres Highlight war die Exkursion zum Innovationskraftwerk Reick der SachsenEnergie AG, wo die dort vorhandenen Wärme- und Batteriespeicher genauer betrachtet werden konnten. Die Woche wurde eingrahmt von einem Wissenschaftskommunikations-Workshop, in dem die Teilnehmerinnen auf unterhaltsame Art und Weise ihre Forschungsthemen als Science-Slam-Beiträge präparierten. Die Ergebnisse wurden am Ende der Woche vor dem Physikleistungskurs des Landesgymnasiums Sankt Afra aus Meißen präsentiert. Dass zukünftig „manels“ wieder zu „panels“ werden, liegt nun also am großartigen Engagement und an der Motivation der Teilnehmerinnen und Referentinnen.



Die Teilnehmerinnen der Summer School präsentierten ihre Science-Slam-Beiträge vor einer Schulklasse des Landesgymnasiums Sankt Afra aus Meißen

Foto: Thomas Linde

Die Aufzeichnung der Podiumsdiskussion ist abrufbar über:
<https://www.youtube.com/watch?v=HOqGplpZCQ8>



Workshop “Medium and Mixed Frequency Voltage Stress”

Nachdem der letzte Workshop situationsbedingt online stattfand, konnten wir uns am sechsten September glücklicherweise wieder persönlich treffen. Als Gastgeberin lud die ETH Zürich Forschende quer über den Europäischen Kontinent von der NTNU Trondheim, Universität Bologna, TU Ilmenau, HTWK Leipzig, RWTH Aachen, ETH Zürich, TU Darmstadt, und Hochschule Zittau/Görlitz. zu sich ein. Auch wir, von der Arbeitsgruppe Hochspannungstechnik, waren mit drei Personen vertreten. Am Vorabend trafen sich bereits Angereiste zum gemeinsamen Abendessen im ältesten vegetarischen Restaurant der Welt. Während des Abendessens konnten, neben dem wissenschaftlichen Austausch, Kontakte zu anderen Universitäten und Hochschulen bzw. den dort Forschenden geknüpft und vertieft werden. Tags darauf startete dann der Workshop. Es wurden Beiträge rund um Themen, die sich mit Frequenzen und Spannungsformen abseits der sinusförmigen 50-Hz-Netzspannung vorgestellt und diskutiert. Dabei ging es unter anderem um überlagerte Spannungsformen mit Gleichspannungsanteilen, harmonisch verzerrte Spannungen und mittelfrequente Impulsbelastungen. Ein großer Vorteil besteht darin dass es nicht nur um Ergebnisse oder Veröffentlichungen ging, sondern auch um zukünftige Projekte und den Austausch der Erfahrungen anderer Hochschulen diesbezüglich.



Gruppenfoto der Teilnehmer:innen

Foto: ETH Zürich

Nach einem gemeinsamen Mittagessen und angeschlossenem Kaffee, mit Blick über die Stadt und den Zürichsee, startete der letzte Teil der Veranstaltung. Bei einem Rundgang durch die Hochspannungslabore der ETH Zürich konnten neben den beeindruckenden Versuchsanlagen auch innovative Versuchsstände für Lehrveranstaltungen und Praktika unter die Lupe genommen werden.

Thematisch entkoppelt, aber für alle Teilnehmenden relevanter denn je, wurde sich immer wieder über verschiedene Konzepte der Online-Lehrveranstaltungen der vergangenen zwei Jahre ausgetauscht. Der ungezwungene Austausch von Erfolgen und Misserfolgen erlaubt den Forschenden einen offenen und selbstreflektierenden Umgang mit der eigenen Arbeit in entsprechender Spezialisierung. Vielen Dank an Prof. Christian Franck und das Team des HVL der ETH Zürich für das Organisieren der Veranstaltung. Wir freuen uns auf zukünftige Ausgaben dieses hochspezialisierten Workshops.

Projektstage des Instituts

Im Jahr 2022 wurden am Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik gleich zwei Projektstage durchgeführt, da diese in den letzten Jahren Corona-bedingt ausfallen mussten.

Im Frühjahr haben wir uns aufgrund der noch bestehenden Corona Auflagen entschieden, einen Wandertag mit den Kolleginnen und Kollegen durchzuführen. Wir trafen uns am 13.05.2022 vor der Garnisionskirche in der Nähe der Stauffenbergallee und begannen unsere Wanderung durch den Briesnitzgrund in den Dresdener Norden durch die Heide hin zum Fischhaus, wo wir zusammen Mittagessen konnten. Der Ausflug wurde genutzt, um nach all den Monaten des eingeschränkten Kontaktes endlich wieder in den Austausch unter den Kolleg:innen zu kommen. Bei solchen Gelegenheiten vergisst unser Professor Schegner natürlich nicht die Nachwuchsgewinnung, wie man unschwer auf nachfolgenden Fotos erkennen kann. (Fotos: IEEH / Hr. Keller)



Der zweite Projekttag führte uns dieses Jahr in die heiligen Hallen der Dresdner Verkehrsbetriebe AG. Am 07.10.2022 konnten wir, wie schon in den Jahren vor der Pandemie, wieder über den Tellerrand hinaus auf einen Betrieb schauen, der in erster Linie fachfremd für die Kolleg:innen war. Jedoch stellte sich bei der Vorstellung des Betriebshof Gorbitz mit den Stadtbahnen der DVB AG am Vormittag schnell in Gesprächen heraus, dass es doch große Schnittmengen zwischen den einzelnen Fachrichtungen gab. Man erläuterte uns den kompletten Betrieb der Stadtbahnen in Dresden samt Wartung und Instandsetzung und wir konnten viele Eindrücke von den einzelnen Stationen mitnehmen. Sogar die „Neue“ für Dresden konnten wir von Innen besichtigen und das neue Raumgefühl erleben, noch bevor diese in den regulären Linienbetrieb geht. Nach dem Besuch des Betriebshofes in Gorbitz ging es zum gemeinsamen zünftigen Mittagessen in das „Gasthaus zum Schießhaus“, wo die Kolleg:innen wieder untereinander rege in den Austausch kommen konnten. Nach dieser Stärkung konnten dann am Nachmittag weitere Themenschwerpunkte in zwei Gruppen erkundet werden. Eine Gruppe besuchte den Betriebshof der DVB AG in Gruna samt der E-Mobility Busflotte. Die Kolleg:innen erhielten Informationen zu Ladeverhalten, Leistungsfähigkeit und Performance der neusten Generation von E-Bussen innerhalb der Verkehrsbetriebe und konnten das Fahrverhalten direkt vor Ort mit einer Rundfahrt über den Betriebshof in einem der neusten E-Busse erleben. Die zweite Gruppe bekam eine Einführung in das Center Infrastructure samt der Elektroenergieversorgung der DVB AG. Dabei konnte der Fahrleitungs-Inspektionswagen in Augenschein genommen werden sowie mehrere Fahrzeuge, welche für die Infrastruktur von Verkehrsbetrieben unabdingbar sind. Abgerundet wurde die Führung mit einem Vortrag über die Elektroenergieversorgung der Dresdner Verkehrsbetriebe. Um diesen sehr schönen Tag gemeinsam enden zu lassen, trafen sich die Kolleg:innen am Nachmittag nach den Führungen an der Hochspannungshalle und es wurde bei Gegrilltem über verschiedene Themen diskutiert und beraten. (Fotos: IEEH / Hr. Keller)



REWE Team Challenge

Mittlerweile ist die Teilnahme an der jährlichen REWE Team Challenge fester Bestandteil der IEEH-Traditionen. Dieses Jahr waren wieder drei Teams für den Firmenlauf durch das Dresdner Stadtzentrum am Start. Mit dabei waren die „Kurzschlussläufer“ und „Wirkleistungskompensierer“ vom Energieforschungsinstitut Dresden (efi e.V.) und „Run until breakdown“ der Professur für Hochspannungs- und Hochstromtechnik, die wieder *blitzschnell* die fünf Kilometer vom Altmarkt bis zum Rudolf-Harbig-Stadion hinter sich brachten.



Die flinken Läufer:innen vom IEEH

Foto: Jan Keller

Feuerlöscherschulung

Sicherheit hat am Insitut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik oberste Priorität. Um diesem hohen Standard gerecht zu werden, konnten wir dieses Jahr die Werkfeuerwehr der TU Dresden überzeugen, die Kolleg:innen des Insituts im Umgang mit Feuerlöschern zu schulen. Es wurde vorab die Theorie über die verschiedenen Arten von Feuern und den Einsatz von entsprechenden Feuerlöschern erläutert, bevor die Mitarbeitenden ein jeder selbst an verschiedene Übungsobjekte zum Löschen musste. Wir danken der Werkfeuerwehr nochmals herzlich für diese interessante und lehrreiche Übungsstunde.

(Fotos: IEEH / Hr. Keller)



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>

