

Komponenten zu Systemen verbinden - Aktuelle Herausforderungen

Maria Hering*, Steffen Großmann

Technische Universität Dresden, Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik, Mommsenstraße 10, 01062 Dresden, DEUTSCHLAND
Telefon +49 351 463 33428,
maria.hering@tu-dresden.de, steffen.grossmann@tu-dresden.de,
www.tu-dresden.de/etieeh

Kurzfassung: Durch den weltweit steigenden Bedarf an Energie und den Wandel in den Strukturen der Energieversorgung verändern sich die Elektroenergiesysteme. Entwickler und Hersteller der Komponenten dieser Systeme stehen vor Herausforderungen, die einen erheblichen Forschungsbedarf generieren, der an einigen Beispielen vorgestellt wird.

Keywords: Gleichspannung, Kontakte, Klima, Alterung

1 Motivation

Das Energieversorgungssystem ist ein aufeinander abgestimmtes Zusammenwirken von Komponenten mit dafür geeigneten Gebrauchswerteigenschaften. Ändern sich die Anforderungen an das System oder dessen Struktur, so bleibt dies nicht ohne Auswirkungen für die Komponenten zum

- Strom leiten sowie Verbinden, Anschließen und Befestigen von Leitern,
- Isolieren elektrischer Potenziale und
- Schalten von Betriebs- und Fehler- bzw. Kurzschlussströmen.

Neue technische, wirtschaftliche und ästhetische Anforderungen beeinflussen die Funktion, die Gestalt, die Werkstoffe und die Fertigungstechnologien, was Entwickler und Hersteller vor große Herausforderungen stellt und einen erheblichen Forschungsbedarf generiert.

2 Welche Ziele stehen zukünftig im Vordergrund?

Die seit etwa zweihundert Jahren sehr schnell wachsende Weltbevölkerung ist bei einem gleichzeitig steigenden Prokopfverbrauch an Energie für den **rasanten Anstieg beim Verbrauch von Primärenergie** verantwortlich (Abbildung 1). Dieser Trend wird sich auch in den nächsten Jahrzehnten insbesondere in Schwellenländern unvermindert fortsetzen und kann durch die begrenzt verfügbaren konventionellen fossilen und nuklearen Energieträger mit den heute verfügbaren Technologien auf lange Sicht nicht gedeckt werden. Es gehört daher zu den herausragenden Zielen,

- den Einsatz alternativer Energieträger weiter zu befördern und zu erforschen und
- den Primärenergiebedarf und die bei der Energiewandlung, dem Transport und der Verteilung auftretenden Verluste maßgeblich zu senken.

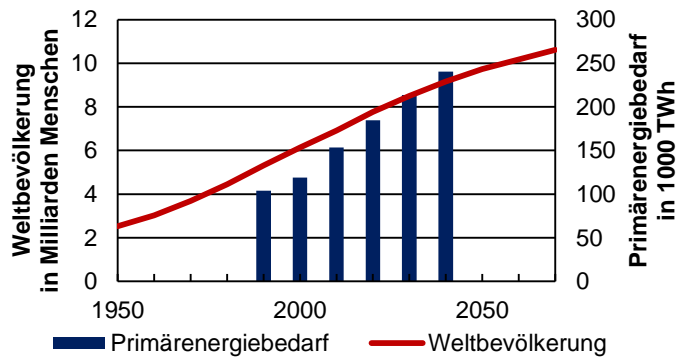


Abbildung 1: Eine anwachsende Weltbevölkerung bedingt auch zukünftig einen rapiden Anstieg des weltweiten Primärenergiebedarfs [1].

Diese globale Zielstellung wird von einigen Staaten in Regierungsprogrammen begleitet und dem trägt auch das Leitthema des 14. Symposiums Energieinnovation Graz 2016 Rechnung: „Energie für unser Europa“ – und unsere Welt [2]. Damit verbunden ist der teilweise **Umbau der bestehenden Elektroenergieversorgungssysteme** (Abbildung 2). Zur Nutzung von beachtlichen Ressourcen an Wasserkraft und von großen Windparks sind häufig besonders lange Transportwege von diesen „zentralen Energiequellen“ zu den Verbrauchern zu bewältigen (Asien, Afrika, Südamerika, auch EU), die nur mit extrem hohen Wechselspannungen über 1 MV oder als Gleichstromübertragung wirtschaftlich realisierbar sind. Diese Technologien sind bekannt und in einigen Projekten bereits realisiert. Allerdings sind die dabei zur Optimierung der eingesetzten Komponenten erforderlichen technisch-physikalischen Grundlagen nur sehr bedingt bekannt. Daneben werden „dezentrale Energiewandler“ die lokale Versorgung mit verschiedenen Energieträgern sicherstellen (Abbildung 3), wenn derartige Zellen untereinander zu einem organischen Verbund zusammengeschlossen werden (zellulärer Ansatz) [3]. Eine nahezu **uneingeschränkte Verfügbarkeit und hohe Zuverlässigkeit** der Energieversorgung bei niedrigen Kosten und moderaten Preisen ist für viele hochentwickelte Industrieländer nahezu zur Selbstverständlichkeit geworden. Auch für die sich entwickelnden Schwellenländer ergibt sich eine unabdingbare Zielstellung, die einen enormen Forschungsbedarf für die verschiedensten Komponenten mit sich bringt.

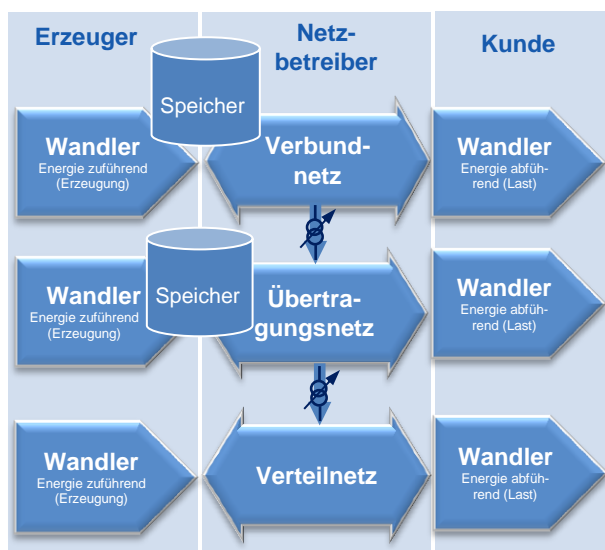


Abbildung 2: Klassisch-hierarchisches Elektroenergieversorgungsnetz mit zentralen Einspeisungen [3]



Abbildung 3: Dezentrale Energiewandler der Idee zum „zellulären Ansatz“ [3]

Ziel: Ausgleich von Erzeugung und Last auf der niedrigsten möglichen Ebene

3 Auf welche Rahmenbedingungen muss reagiert werden?

3.1 Erhöhen der Übertragungsleistungen im Hochspannungsnetz

Der liberalisierte Strommarkt und die notwendigerweise verstärkte Einbindung regenerativer Energien haben die Energieversorgungssysteme verändert und werden diese auch zukünftig bedeutend beeinflussen. Der stark angewachsene Stromhandel in Europa führte auch in Deutschland in den letzten Jahren zu einer erheblich höheren **Strombelastung der Hochspannungs-Übertragungsnetze** (Abbildung 4) [1].

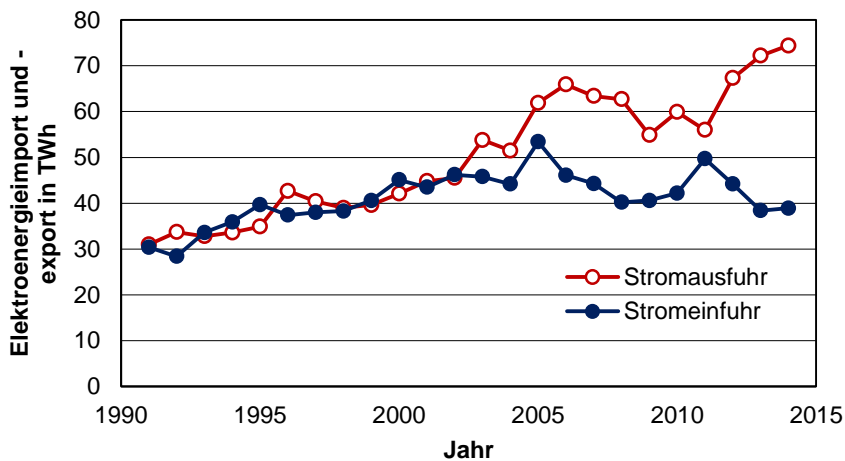


Abbildung 4:
Anstieg des Handels mit elektrischer Energie in Deutschland [1]

Neben dem notwendigen Netzausbau werden die Komponenten bestehender Leitungen und Schaltanlagen im Hochspannungsnetz den neuen Anforderungen angepasst. Das erfolgt beispielsweise durch *Hochtemperaturseile mit geeigneten Armaturen* für zeitweilig zulässige Betriebstemperaturen der Leiter bis 200°C (Abschnitt 4.3). Eine dynamische Betriebsweise durch Nutzung witterungsbedingter Einflüsse (Umgebungstemperatur, Wind) mittels *Freileitungsmonitoring* kann ebenfalls einen Beitrag zur Erhöhung der Stromtragfähigkeit leisten, wenn in diese Betrachtungen alle betroffenen Komponenten einbezogen und der Einfluss auf deren Langzeitverhalten bekannt ist [4]. Untersuchungen dazu sind notwendig, wenn ein frühzeitiger Ausfall des Systems durch beschleunigte Alterung einzelner Komponenten vermieden werden soll [5].

Für neu zu errichtende Übertragungssysteme, insbesondere über große Entfernungen, kommen **höhere Betriebsspannungen** (>> 500 kV) und **Hochspannungs-Gleichspannungssysteme** zum Einsatz. Obwohl derartige Anlagen bereits errichtet wurden, sind die Kenntnisse zu den technisch-physikalischen Grundlagen als Voraussetzung für ein optimiertes, langfristig zuverlässiges und wirtschaftliches Design der Komponenten bislang sehr begrenzt [6]. Einige grundlegende Erkenntnisse zum Isolierverhalten von Luftfunkenstrecken für *Betriebsmittel unter Freiluftbedingungen* bei Belastung mit Gleichspannung zeigen, dass die für Wechselspannung bekannten physikalischen Modelle und Bemessungsrichtlinien nur bedingt für Gleichspannung gültig sind [7]. Ähnliches gilt für Öl-Papier-Isolierungen in *Transformatoren* für Konverterstationen, die neben der Wechselspannung zusätzlich hochfrequenter impulsförmiger Spannungsbelastung [8] sowie einer Belastung mit Gleichspannung ausgesetzt sind (Abschnitt 4.1) [9]. Gekapselte, gasisolierte *SF₆-Schaltanlagen* folgen bei hohen Gleichspannungen ebenfalls anderen Gesetzmäßigkeiten als bei Belastung mit Wechsel-

spannung (Abschnitt 4.1) [10]. Die Auswahl und Bemessung von Isolatoren für Hochspannungs-DC-Freileitungen und -Schaltanlagen hinsichtlich des Isoliervermögens in verschiedenen Verschmutzungszonen sowie die Prüfung von *Isolatorenketten* ist weiterhin Gegenstand der Diskussion in internationalen Gremien.

3.2 Neue Anforderungen an Mittel- und Niederspannungsnetze

Die traditionell hierarchische Netzstruktur mit eindeutiger Energieflussrichtung ist längst durch eine dezentrale Einspeisung und einen bidirektionalen Energiefluss ergänzt worden, woraus sich die Rahmenbedingungen für Betriebsmittel und Komponenten der Nieder- und Mittelspannungstechnik ergeben:

- Höhere Strombelastungen, neue Lastprofile und Energieflussrichtungen verändern die **thermische Beanspruchung** und die Spannungsverteilung längs von Leitungen.
- Kompaktheit, Platzmangel und Kostendruck erhöhen die **Leistungsdichte** und teilweise die Verluste.
- Einzug der Schutz- und Leittechnik erfordern „intelligente“ **NS-/MS-Betriebsmittel**.

Außerdem sind ressourcenschonende Verfahren zum **Recycling** von Komponenten zwingend zu erarbeiten und anzuwenden. Zu den Beispielen, bei denen sich Komponentenhersteller auf diese neuen Anforderungen erfolgreich einstellen, gehören u.a. die *Mittelspannungs-Transformatoren mit Stufenschaltern* [11], moderne Berechnungsverfahren zur Bemessung *paralleler Sammelschienen in Niederspannungsschaltanlagen* [12] und das flächendeckende Angebot zum *Recycling von NH-/HH-Sicherungen* in Deutschland [13].

3.3 Erweiterte klimatische Einsatzgebiete

Die Nutzung von natürlichen Wasserressourcen und von Windenergie sowie die voranschreitende Versorgung der Bevölkerung und von Bergbau- und Industriegebieten mit elektrischer Energie rückt weltweit immer weiter in klimatisch anspruchsvolle Regionen vor. Die Grundlagen für die Bemessung und die Erfahrungen zum Betriebsverhalten von Isolierungen und Strombahnen unter **extremen Klimabedingungen** sind nur sehr begrenzt bekannt und bedürfen einer weiteren Erforschung, wenn auch für diese Regionen ähnliche Standards zur Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Elektroenergie erreicht werden sollen, wie sie in Europa üblich sind.

3.4 Veränderte gesellschaftliche Wahrnehmung und Akzeptanz

Während die Elektrifizierung im zwanzigsten Jahrhundert noch als technische Errungenschaft gefeiert und als Ausdruck wachsenden Wohlstandes angesehen wurde, sind die Ansprüche der Europäer an Anlagen und Betriebsmittel der Elektroenergieversorgung hinsichtlich **Ästhetik, Ökologie und gesundheitlicher Unbedenklichkeit** in den letzten Jahrzehnten berechtigterweise deutlich gewachsen. Parallel dazu werden unkorrekte Informationen und Unkenntnis zu technisch-physikalischen Zusammenhängen und daraus resultierende Unsicherheiten und Ängste in einzelnen Bevölkerungsgruppen zu Hindernissen für den Fortschritt. Hier gilt es mit den Betroffenen einen fairen Dialog zu führen und nach gesellschaftlich, ökologisch und wirtschaftlich akzeptablen Lösungen zu suchen.

4 Beispiele für aktuelle Herausforderungen

Mit einigen ausgewählten Beispielen aus der aktuellen Forschung der TU Dresden an Komponenten für Elektroenergieversorgungssysteme der Zukunft soll ein Beitrag zum Ziel „Energie für unser Europa und unsere Welt“ aufgezeigt werden.

4.1 Komponenten für hohe Gleichspannung (HVDC)

Herausforderungen

Um hohe Gleichspannungen zur verlustarmen Energieübertragung nutzen zu können, muss das Isolationsvermögen der zu verwendenden Isoliersysteme umfassend bekannt sein. Das Entladungsverhalten unter Gleichspannungsbelastung unterscheidet sich jedoch grundlegend von dem bei Wechsel- oder Impulsspannungsbelastung, da in den Dielektrika langsam ablaufende Vorgänge bestimmend sind. Die Ursachen sind begründet in Raumladungs- und Grenzflächenpolarisationen in festen Isolierstoffen, in Ionendriftvorgängen in Flüssigkeiten, in der Akkumulation von Ladungsträgern auf Grenzflächen und in der Feldumbildung aufgrund der temperaturabhängigen Leitfähigkeit der Isolierstoffe. Demnach führen numerische Feldberechnungen unter der Annahme konstanter und homogener Materialeigenschaften zu falschen Ergebnissen. Oberflächen- und Raumladungen bestimmen die für die Entladungen entscheidenden lokalen Feldstärken. [14]

Untersuchungen an langen Luftfunkenstrecken

Bei Hochspannungsprüfungen im Labor werden typischerweise Drahtzuleitungen zwischen Prüfanlage und Prüfobjekt genutzt. Die um den Draht entstehende Ultrakorona verursacht eine starke Raumladung, deren Ladungsträger sich im Gleichfeld gerichtet bewegen. Dadurch werden die Feldverhältnisse innerhalb der Prüfstrecke durch Effekte außerhalb der Prüfstrecke beeinflusst. Diese parasitären Entladungen an Zuleitungen, Prüfanlagen und anderen (auch geerdeten) Objekten in der Nähe können bei Gleichspannung:

- zu höheren Teilentladungseinsetz- und Durchschlagsspannungen am zu prüfenden Gerät führen (Abbildung 5),
- das Finden eventueller Fehlstellen verhindern,
- aber auch den Nachweis der Teilentladungsfreiheit verhindern,
- zu von Zeitpunkt und Dauer der Prüfung abhängigen Prüfergebnissen führen und
- eine schlechte Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bewirken.

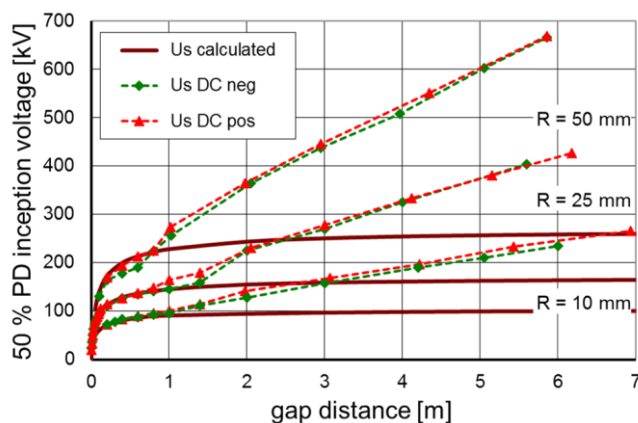


Abbildung 5:

Unter Gleichspannung werden an einer Kugel-Platte-Anordnung deutlich höhere Einsetzspannungen gemessen als nach dem Streamerkriterium berechnet worden sind. Ursache sind die Teilentladungen am verwendeten Zuleitungsdraht zwischen Prüfanlage und Prüfobjekt. [7]

Untersuchungen an Öl-Papier-Isolierungen für Transformatoren

Für das Leitfähigkeitsverhalten von Isolierwerkstoffen wird die Gültigkeit des Ohm'schen Gesetzes in einem linearen und isotropen Dielektrikum angenommen. Untersuchungen an Öl-Papier-Isolierungen zeigen jedoch ein nichtlineares Strom-Zeit-Verhalten bei Gleichspannungsbelastung. Außerdem ist das Entladungsverhalten nicht mit gängigen kapazitiv-resistiven Modellen (RC) erklärbar, sondern nur unter Berücksichtigung der ladungsträgerbasierten Leitfähigkeitsprozesse: Bildung, Bewegung und Rekombination von Raumladungen (Abbildung 6). Die Leitfähigkeit ist dann nicht mehr als integrale unabhängige Größe zu verstehen, sondern als Zusammenspiel differenzieller bzw. lokaler feldstärkeabhängiger Teilprozesse. Ein möglicher Ansatz ist das Poisson-Nernst-Planck-Gleichungssystem (PNP).

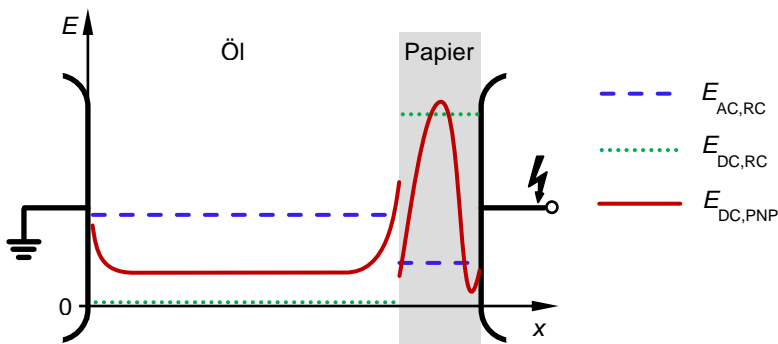


Abbildung 6:

Die qualitative Feldverteilung nach RC-Modellen kann experimentell gefundene Zusammenhänge innerhalb eines Öl-Papier-Spaltes nicht widerspruchsfrei erklären. Wird zur Modellierung jedoch der Ansatz nach Poisson-Nernst-Planck (PNP) genutzt, ist dies möglich. [9]

Untersuchungen an Gas-Feststoff-Isolierungen für gasisolierte Systeme

Um gasisolierte Systeme für die Hochspannungsgleichstromübertragung einsetzen zu können, müssen die bei Wechselspannung bewährten Dimensionierungsrichtlinien angepasst werden. Im Vergleich zu Wechselspannungsanwendungen wird das Gleichspannungsfeld von zum Teil temperaturabhängigen Leitfähigkeiten der Isoliermaterialien bestimmt. Betriebsströme führen zu einer inhomogenen Temperaturverteilung zwischen Innenleiter und Gehäuse. Der radial angeordnete Isolator erfährt somit den vollen Temperaturgradienten. Da sich die Leitfähigkeit des Isolators in diesem Temperaturbereich um mehrere Größenordnungen verändert, bildet sich das Feld nach Zuschalten einer Gleichspannung vom elektrostatischen Feld zum stationären Strömungsfeld um (Abbildung 7). Dieser sogenannte kapazitiv-resistive Übergang konnte abhängig von zusätzlichen Ladungsträgern erstmals experimentell anhand von Übersichtsversuchen nachgewiesen werden. [10]

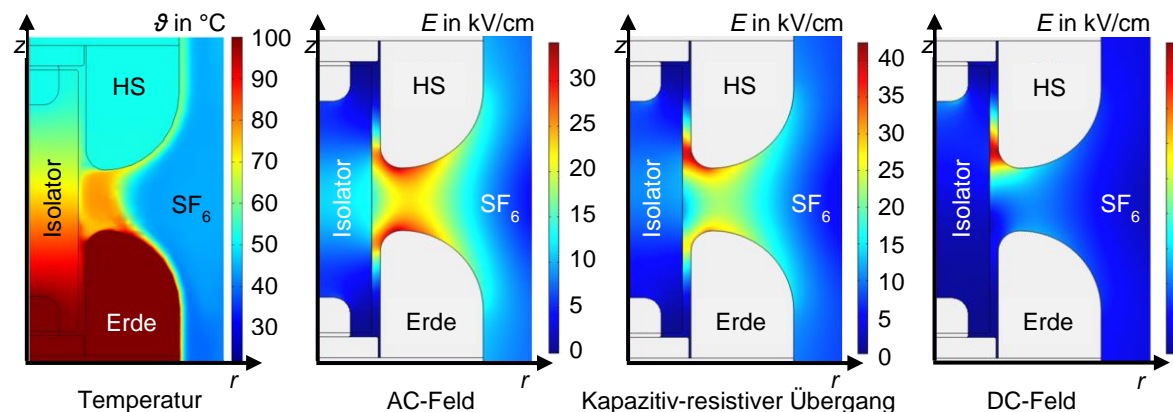


Abbildung 7: Die experimentellen Ergebnisse bestätigen, dass sich der Ort der Höchstfeldstärke in kältere Bereiche verschiebt. Da sich im Vergleich zum AC-Feld eine absolut höhere Feldstärke einstellt, ist das Isoliervermögen der Anordnung unter Gleichspannungsbedingungen um (10 ... 15) % herabgesetzt. [10]

4.2 Nieder- und Mittelspannungsschaltanlagen

Herausforderungen

Komponenten in räumlich kompakten Nieder- und Mittelspannungsschaltanlagen müssen trotz teilweise extrem hoher thermischer Belastung den Betriebs- und Kurzschlussstrom langfristig sicher und zuverlässig führen und schalten können.

Das zuverlässige Langzeit-Betriebsverhalten von NH-Sicherungen

Niederspannungs-Hochleistungssicherungen (NH-Sicherungen) kommen in großen Stückzahlen in Schalt- und Verteilungsanlagen zum Einsatz. Die Einsatzbedingungen dafür haben sich in letzter Zeit signifikant geändert:

- Immer kompaktere, kleinräumige Anlagen bringen eine erheblich schlechtere Ableitung der Verlustwärme längs und quer zur Leiterbahn mit sich und können somit zur thermischen Überlastung führen und das Abschaltverhalten beeinflussen.
- Der Einsatz bleifreier Lote nach RL 2011/65/EU [15] verändert die Interdiffusion zwischen Schmelzleiter und Lot und kann so langfristig die Abschaltkennlinie verändern.
- Photovoltaik- und Biogasanlagen bedingen eine dauernde Belastung mit Bemessungsstrom, wofür Sicherungen im Langzeitbetrieb in der Praxis nicht ausgelegt sind.

Es ist das Ziel von Langzeituntersuchungen, Kriterien für einen langzeitstabilen Betrieb von Sicherungseinsätzen unter den aktuellen Anforderungen zu definieren. Der Einsatz von Sicherungen bei erhöhter Umgebungs- und Schmelzleitertemperatur darf nicht zum Schaltversagen oder zu Fehlabschaltungen führen. Dazu ist die physikalisch begründete Angabe der maximal zulässigen Temperatur des Kontaktmessers (nur hier ist die Temperatur praktisch messbar) für die Anwendung in Prüfungen abhängig von der Schmelzleiter-Lot-Kombination notwendig. In Laborversuchen werden dazu die elektrischen Widerstände von unterschiedlichen Schmelzleitern bei Temperaturen zwischen 140 °C und 220 °C ermittelt. Erste Ergebnisse nach 5000 h lassen einen deutlichen Einfluss von Oxidation und Interdiffusion auf das Langzeitverhalten unterschiedlicher Schmelzleiter (besonders bei SnBiCu-Loten) erkennen, während sich Schmelzleiter mit anderen Loten bis 200 °C bisher nicht verändern (Abbildung 8). Somit werden möglicherweise unterschiedliche Grenztemperaturen abhängig von der Schmelzleiter-Lot-Kombination erforderlich werden, was Einfluss auf die Auswahl und die Einsatzbedingungen von Schmelzsicherungen haben wird.

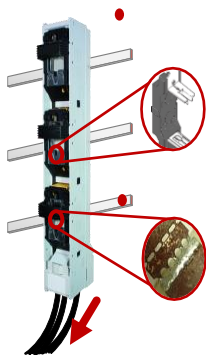


Abbildung 8a: NH-Sicherungsleiste mit Schmelzeinsätzen bei 140 °C Schientemperatur

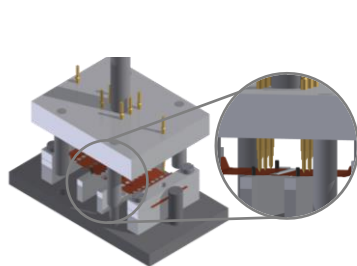


Abbildung 8b: Versuchsaufbau zum Ermitteln der Widerstände von Schmelzleitern bei Temperaturen bis 220 °C im Langzeittest

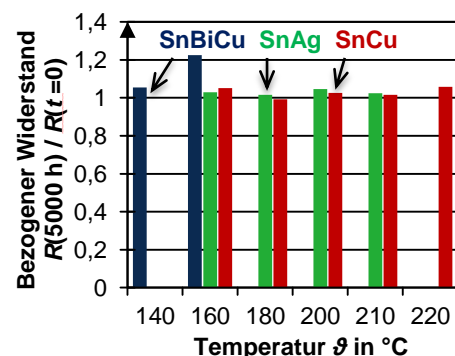


Abbildung 8c: Versuchsergebnis: Einzelne gemessene Widerstände verändern sich innerhalb von 5000 h signifikant.

4.3 Anschluss- und Verbindungstechnik

Herausforderungen

Elektrische Verbindungen und Anschlüsse sind in allen Spannungsebenen der Energieversorgungsnetze millionenfach vorhanden. Einzelne, schlecht hergestellte oder unsachgemäß montierte Verbindungen können zum Ausfall von Teilen eines Netzes führen und erheblichen wirtschaftlichen Schaden verursachen. Von elektrischen Verbindungen wird, so wie vom gesamten Netz, eine Lebensdauer von vielen Jahrzehnten erwartet, worin die belastungsabhängige Alterung der Kontaktstellen einer Verbindung einzubeziehen ist. Daher ist es notwendig die physikalischen Vorgänge der Alterung zu studieren, um Hinweise zur Gestaltung, zu den einzusetzenden Werkstoffen und zur richtigen Montage geben und die Lebensdauer abhängig von der elektrischen und umgebungsbedingten Belastung abschätzen zu können. Alle Alterungsmechanismen sind temperatur- und somit von der Strombelastung abhängig.

Verbindungen für Hochtemperatur-Freileitungsseile

Eine Möglichkeit, die momentan zulässige Stromtragfähigkeit von bestehenden Hochspannungs-Freileitungen zu erhöhen, ohne Grenztemperaturen zu überschreiten, bietet das Freileitungs-Monitoring, welches die aktuellen Witterungsbedingungen berücksichtigt. Dabei werden jedoch die existierenden elektrischen Verbindungen thermisch höher belastet, was zu einer schnelleren Alterung führt und damit vorzugsweise dort zum Einsatz kommt, wo höhere Strombelastungen nur kurzzeitig zu erwarten sind [5]. Weiterhin ermöglichen Hochtemperaturseile (HTLS ... high temperature low sag) für Betriebstemperaturen bis 200 °C mit unterschiedlichen Seilkonstruktionen eine zeitweilig deutlich höhere Stromtragfähigkeit von Freileitungen. Die dafür erforderlichen elektrischen Verbinder müssen den langfristig zuverlässigen Betrieb bei diesen hohen Temperaturen gewährleisten. In Langzeituntersuchungen unter Zugbelastung über mehrere Jahre wird das elektrische und mechanische Verhalten untersucht und in Berechnungsmodellen simuliert. Mit Hilfe eines eigens dafür entwickelten Modells zum spezifischen Querwiderstandsbelages R'_q kann die elektrische Güte der hier verwendeten Sechskant-Pressverbindungen abhängig vom erreichten Kompressionsfaktor K_F beim mechanischen Fügen ermittelt werden (Abbildung 9).

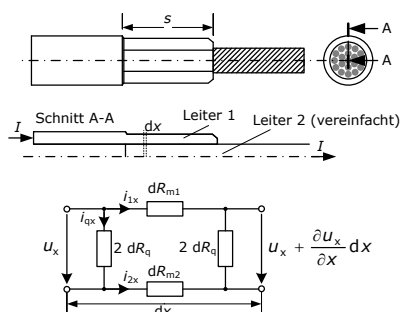


Abbildung 9a: Modellvorstellung und elektrisches Ersatzschaltbild für eine Sechskantverpressung

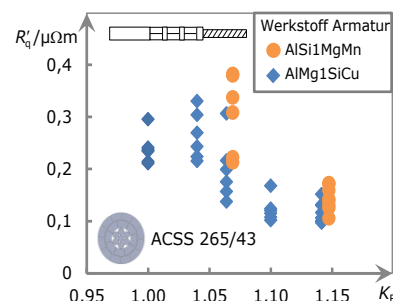


Abbildung 9b: Spezifischer Querwiderstandsbelag R'_q abhängig vom erreichten Kompressionsfaktor K_F



Abbildung 9c: FEM-Modell der Sechskantverpressung im Vergleich zum Schnitt durch eine reale Verbindung

Verbindungen unter „extremen klimatischen Bedingungen“

Der Normung, Auswahl und Dimensionierung elektrischer Verbindungen in der Elektroenergie-technik basiert bislang weitgehend auf Erfahrungen mit europäischen Umgebungsbedingungen. Mit der immer intensiveren Nutzung von Wasserkraft und Offshore-Windparks weit entfernt von den zu versorgenden riesigen Ballungsgebieten in anderen Kontinenten sind Kenntnisse auch zum Langzeitverhalten von Verbindungen unter (aus europäischer Sicht) „extremem“ Klima erforderlich. In Dauerversuchen wird der Verbindungswiderstand R_v typischer realer technischer Verbindungen unter sehr unterschiedlichen Umgebungsbedingungen teilweise bereits über drei Jahre beobachtet. Vergleichende Versuche wurden unter Wüsten- und Küstenbedingungen in Ägypten, im tropischen Regenwald Brasiliens [16], unter subpolaren Bedingungen im nördlichen Sibirien sowie im Tropenhaus des Botanischen Gartens in Dresden angesetzt (Tabelle 1, Abbildung 10).

	ϑ	$\Delta\vartheta$	RH	Beschleunigte Reaktionen	Ort
Wüste	↑↑	↑↑	↓	→	
Regenwald	↑	→	↑↑	↑	
Küstenregion	→	→	↑↑	↑↑	
Extreme Kälte	↓↓	↑↑	↑↑	↑	

Tabelle 1: Übersicht über die klimatischen Bedingungen (Umgebungstemperatur ϑ , Temperaturschwankungen $\Delta\vartheta$, relative Luftfeuchtigkeit RH und Luftzusammensetzung) an den verschiedenen Versuchsorten

Bis jetzt konnten noch keine signifikanten Widerstandserhöhungen gemessen werden, was für die Qualität der Verbinder spricht (Abbildung 11). Die Ansichtsgüte einiger galvanischer Beschichtungen hat sich jedoch bereits deutlich verändert (Abbildung 12).

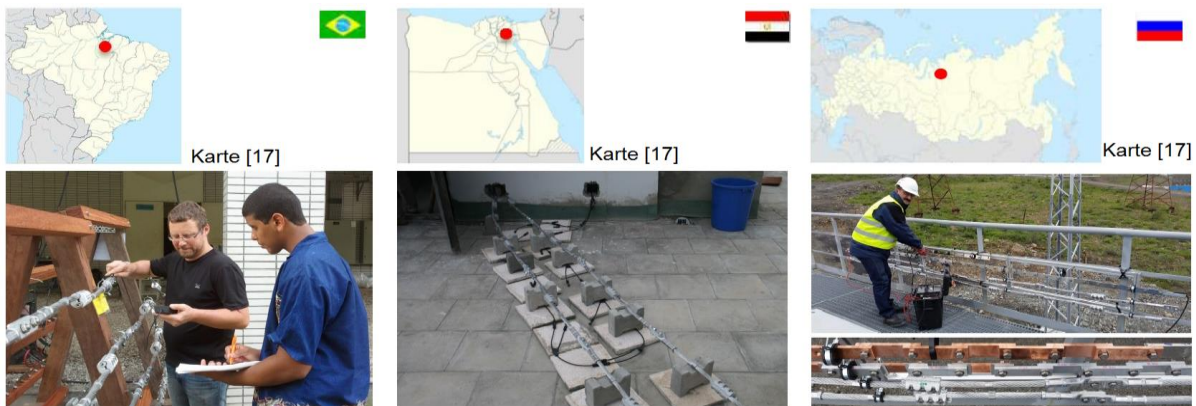


Abbildung 10a: Freileitungsarmaturen, Stromschiennenverbindungen und PV-Stecker im Regenwald bei Belém/Brasilien

Abbildung 10b: Gleiche Prüflinge altern auf einem Gebäude in der Wüste bei Ismailia in Ägypten sowie an der Mittelmeerküste bei Port Said.

Abbildung 10c: Auslagerungsversuche in Norilsk repräsentieren den Einfluss extremer Kälte im Norden Russlands.

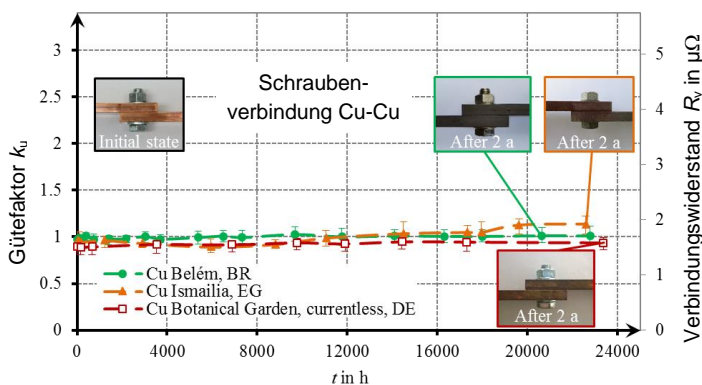


Abbildung 11: Der Verbindungswiderstand R_v , z. B. von verschraubten, unbeschichteten Kupferstromschiennen ändert sich bisher nicht signifikant.



Abbildung 12:
Auf der Oberfläche versilberter Kupferstromschiene sind deutliche Veränderungen zu beobachten.

5 Fazit

Auch längst bekannte und erprobte Betriebsmittel und Komponenten sowie deren physikalische Funktionsprinzipien kommen unter den sich verändernden Bedingungen in den Elektroenergieversorgungssystemen erneut auf den Prüfstand und erfordern umfangreiche, wissenschaftliche Forschung. Die Energiewende ist mehr als der (dringend notwendige) Zubau regenerativer Energiequellen. Der Vortrag will damit einen Beitrag zum Leitthema des Symposiums – „Energie für unser Europa und unsere Welt“ – leisten.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Statistikportal: [Online]. <http://de.statista.com/>. [Zugriff am 9. Januar 2016].
- [2] U. Bachhiesl: *Energie für unser Europa - Leitthema des Symposiums, 14. Symposium Energieinnovation, Graz, 2016.*
- [3] VDE-Studie: Der Zellulare Ansatz - Grundlage einer erfolgreichen, regionenübergreifenden Energiewende. Frankfurt am Main, 2015.
- [4] I. Berg: Untersuchungen zur Strombelastbarkeit der Geräte der Elektroenergieübertragung. Dissertation, TU Dresden, 2010.
- [5] S. Großmann, H. Löbl, D. Bölke und U. Schäfer: Erhöhung der Strombelastbarkeit von Freileitungen und Schaltanlagen - Möglichkeiten und Risiken. *11. Symposium Energieinnovation, Graz, 2010.*
- [6] M. Hering, J. Speck, K. Backhaus, S. Großmann und U. Riechert: Capacitive-resistive transition in gas insulated DC systems under the influence of particles on the insulator surface. *19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, 2015.*
- [7] I. Ovsyanko: Entladungsverhalten von Luftfunkenstrecken bei hohen Gleichspannungen. Dissertation, TU Dresden, 2012.
- [8] S. Rahmoon: Elektrisches Verhalten der Windungsisolierung von Öltransformatoren. Dissertation, TU Dresden, 2008.
- [9] K. Backhaus: Das dielektrische Verhalten der Öl-Papier-Isolierung bei Belastung mit hoher Gleichspannung. Dissertation, TU Dresden, 2016.
- [10] M. Hering: Überschlagsverhalten von Gas-Feststoff-Isoliersystemen unter Gleichspannungsbelastung. Dissertation, TU Dresden, 2016.
- [11] S. Rehkopf und U. Kaltenborn: Tap-changers for regulating transformers. München, 2015.
- [12] R. Adam, S. Großmann, F. Muck und W. Reincker: Investigation on the current displacement in main busbar systems with several subconductors of low-voltage switchgear and controlgear assemblies. *5th Annual International Travelling Conference ERIN, Tatranská Kotlina, Slovakia, 2011.*
- [13] Der Verein NH/HH-Recycling e.V.: [Online]. <http://www.nh-hh-recycling.de/>. [Zugriff am 23. Januar 2016].
- [14] J. Speck, M. Hering, K. Backhaus und I. Ovsyanko: Discharge behaviour under DC stress and its consequences on high voltage tests. *Highvolt-Kolloquium, Radebeul, 2015.*
- [15] *RL 2011/65/EU - Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 08. Juni 2011, Straßburg: Amtsblatt der Europäischen Union, 2011.*
- [16] S. Dreier, S. Großmann, G. Moustafa, D. Guirraes dos Santos, B. Rocha und V. Macedo: Long term behaviour of stationary electrical connections in areas with harsh natural environmental conditions. *CIGRÉ Science & Engineering Journal, 2015.*
- [17] Wikipedia: [Online]. <https://www.wikipedia.de/>. [Zugriff am 23. Januar 2016].