

# NUMERISCHE SIMULATION VON FELDSTEUERUNGSMATERIALIEN IN GASISOLIERTEN HOCHSPANNUNGSGLEICHSTROMROHRLEITERN

**Hendrik Hensel\***

*Bergische Universität Wuppertal, Rainer-Gruenter-Str. 21, 42119 Wuppertal*

**Markus Clemens**

*Bergische Universität Wuppertal, Rainer-Gruenter-Str. 21, 42119 Wuppertal*

Gasisolierte Rohrleiter bestehen aus einem geerdeten Gehäuse, isolierendem Gas und einem Innenleiter, welcher durch einen Stützhalter aus isolierendem Feststoff in Position gehalten wird. Als Isoliergas wird meist Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ) verwendet und für den Stützhalter isolierendes Epoxidharz. Unter Gleichstrombedingungen kommt es zu Raumladungsakkumulationen im Isoliermaterial, welche in einem lokalen Anstieg der elektrischen Feldstärke resultiert und damit zu einer Teilentladung oder Gefährdung des sicheren Betriebs des Systems führen kann. Insbesondere die Grenzfläche zwischen fester Isolierung und Gasisolierung ist empfindlich gegenüber hohen elektrischen Feldstärken. Um hohe elektrische Feldstärken zu minimieren sind nichtlineare Isoliermaterialien, eingesetzt als Feldsteuerungstechnik, derzeitiger Gegenstand der Forschung. Diese Art der Feldsteuerung kann durch verschiedene Techniken und Materialien angewendet werden, welche hier mit numerischen Feldsimulationen untersucht werden. Dabei kommen polymere Verbundwerkstoffe als Füllstoffe für den Stützhalter zum Einsatz, dessen elektrische Leitfähigkeit eine nichtlineare Abhängigkeit vom elektrischen Feld haben und ab gewissen kritischen Feldstärken in eine Erhöhung der Leitfähigkeit resultieren und damit die Feldbelastung minimieren. In dieser Arbeit werden verschiedene Materialien und dessen Auswirkungen auf die elektrische Feldverteilung in Hochspannungsgleichstromrohrleitern untersucht. Die Ergebnisse werden mit anderen Feldsteuerungstechniken, wie der gezielten räumlichen Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit durch Füllstoffe mit konstanter Leitfähigkeit, verglichen.

## 1. Einführung

Gasisolierte Hochspannungsgleichstromrohrleiter (engl. GIL) sind eine vielversprechende Technologie für die kommenden Herausforderungen, die sich aus der Integration erneuerbarer Energien in das Stromversorgungssystem ergeben. Da Strom aus erneuerbaren Energiequellen oft über große Distanzen übertragen werden muss, z.B. von Offshore-Windparks oder Wasserkraftwerken zu Industriegebieten, steigt die Nachfrage nach der Hochspannungsgleichstromübertragungstechnik (engl. HVDC), da sie ab einer bestimmten Leitungslänge ökonomisch günstiger ist als die Energieübertragung über Wechselstrom (engl. HVAC) [1], [2]. Darüber hinaus bieten gasisolierte Systeme eine hohe Übertragungskapazität elektrischer Energie, eine hohe Zuverlässigkeit und eine erheblich reduzierte Baugröße, die für den Einsatz in städtischen Gebieten oder auf Offshore-Plattformen geeignet ist [3]. GIL bestehen aus einem Innenleiter, welches von isolierendem Gas umgeben ist, einem Stützhalter, der den Innenleiter in Position hält, und einem geerdeten Gehäuse. Als Isoliergas wird meist noch

Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ) verwendet, welches auf Werte von 1-6 bar komprimiert wird, um eine Durchschlagsfestigkeit zu erreichen, die bis zu zehnmal höher ist als die von Luft [4]. Daher benötigen GIL im Vergleich zu anderen Übertragungstechniken weniger Platz.  $\text{SF}_6$  ist jedoch ein Treibhausgas mit einem 25.000-fach höheren Erderwärmungspotential als Kohlenstoffdioxid. Daher sieht die jüngste F-Gase-Verordnung der Europäischen Union (EU) eine schrittweise Reduzierung von  $\text{SF}_6$  in gasisolierten Systemen vor [5]. Das Isoliermaterial für den Stützhalter besteht hauptsächlich aus Epoxidharz, welches mit Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) oder Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) gefüllt ist [3]. Die Erfahrungen mit HVDC GIL sind im Vergleich zum Wechselstrombetrieb begrenzt [6]. Der Hauptunterschied zwischen AC und DC ist die langsame Ladungsakkumulation im Isoliermaterial, die unter DC-Bedingungen auftritt [7]. Die Ladungsakkumulation führt zu einem Anstieg der lokalen elektrischen Feldstärke, was zu Teilentladungen oder einer Gefährdung des sicheren Betriebs des Systems führen kann. Insbesondere die Grenzfläche zwischen fester und gasförmiger Isolierung ist sehr empfindlich

gegenüber hohen elektrischen Feldstärken [8]. Eine Optimierung der elektrischen Feldverteilung bzw. eine Minimierung der elektrischen Feldbelastung könnte durch Feldsteuerungstechniken durch Polymermaterialien erfolgen, welche die elektrische Leitfähigkeit in den Isoliermaterialien nutzt, um das elektrische Feld gezielt zu minimieren [9]. Nichtlineare feldsteuernde Materialien besitzen eine feldabhängige elektrische Leitfähigkeit, die von einem niedrigen Leitfähigkeitswert auf einen höheren Wert wechselt, wenn ein gewisser kritischer elektrischer Feldstärkewert erreicht wird, welche die lokale Feldstärke senken [9]. Dafür werden polymere Verbundwerkstoffe in das Epoxidharz des Stützhalters gemischt, welche diese elektrischen Eigenschaften aufweisen. Eine weitere Feldsteuerungstechnik stellen „functional graded materials“ (FGM) dar, welche eine räumliche Verteilung von Füllstoffen mit konstanten Parametern, wie der elektrischen Leitfähigkeit, realisieren. Dabei werden Füllstoffe mit den gewünschten elektrischen Eigenschaften im Epoxidharz gezielt verteilt, um bspw. an kritischen Orten der elektrischen Feldstärke eine höhere elektrische Leitfähigkeit zu erzielen [10]. FGM ist jedoch fertigungstechnisch schwierig zu realisieren [11]. In dieser Arbeit sollen die genannten Feldsteuerungstechniken durch numerische Feldsimulationen untersucht und die Ergebnisse miteinander verglichen werden. In Abschnitt 2 wird die Herleitung zur Berechnung der elektrischen Feldstärke in HVDC GIL und polymere Verbundstoffe als Feldsteuerungstechnik beschrieben. In Kapitel 3 werden die Ergebnisse der elektrischen Feldsimulationen vorgestellt und in Kapitel 4 werden die Ergebnisse zusammengefasst.

## 2. Vorgehen

### 2.1. Berechnung der elektrischen Feldstärke

Aufgrund der Raumladungsakkumulation innerhalb des Isoliermaterials bei Gleichstrombetrieb tritt in HVDC GIL ein sich langsam zeitlich veränderliches elektro-quasistatisches Feld auf. Im Allgemeinen werden zur Berechnung des elektrischen Feldes die Poisson-Gleichung, die Kontinuitätsgleichung und das Ohmsche Gesetz verwendet:

$$\operatorname{div}(\varepsilon_0 \varepsilon_r \operatorname{grad} \varphi) = -\rho, \quad (1)$$

$$\operatorname{div} \vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

$$\vec{j} = \kappa(T, |\vec{E}|) \vec{E}, \quad (3)$$

wobei  $\vec{j}$  die Stromdichte,  $\rho$  die Raumladungsdichte,  $\varepsilon_0 \approx 8.854 \cdot 10^{-12}$  As/(Vm) die elektrische Feldkonstante,  $\varepsilon_r$  die relative Permittivität,  $\kappa$  die elektrische Leitfähigkeit,  $T$  die Temperatur,  $\varphi$  das elektrische Potential und  $\vec{E}$  das elektrische Feld darstellen [2], [12]. In der Elektro-Quasistatik können induktive Effekte vernachlässigt werden, womit gilt:

$$\vec{E} = -\operatorname{grad} \varphi. \quad (4)$$

Werden (1), (3) und (4) in (2) eingesetzt, lautet die Skalarpotentialformulierung für elektro-quasistatische Felder

$$\operatorname{div}(\kappa(T, |\vec{E}|) \operatorname{grad} \varphi) + \frac{\partial}{\partial t} \operatorname{div}(\varepsilon_0 \varepsilon_r \operatorname{grad} \varphi) = 0. \quad (5)$$

Die Temperaturverteilung kann mit der Wärmetransportgleichung berechnet werden:

$$\delta c_p \frac{\partial}{\partial t} T = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + \frac{\partial}{\partial t} \operatorname{div}(\varepsilon_0 \varepsilon_r \operatorname{grad} \varphi) = 0. \quad (6)$$

wobei  $\kappa(T, |\vec{E}|) |\vec{E}|^2$  die Verlustleistungsdichte im Isoliermaterial,  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit,  $\delta$  die Dichte und  $c_p$  die spezifische Wärmekapazität darstellen [13]. Die Gleichungen (5) und (6) für das elektrische Feld bzw. die Temperatur sind durch die elektrische Leitfähigkeit  $\kappa$  gekoppelt. Die elektrische Leitfähigkeit des Epoxidharzes des Stützhalters weist eine nichtlineare Abhängigkeit von Temperatur und elektrischer Feldstärke auf und wird beschrieben durch:

$$\kappa(T, |\vec{E}|) = \kappa_0 \exp\left(-\frac{W_A}{k_B T}\right) \exp(\vartheta |\vec{E}|), \quad (7)$$

wobei  $k_B = 8.617 \cdot 10^{-5}$  eV/K die Boltzmannkonstante,  $W_A = 0.095$  eV die Aktivierungsenergie und  $\kappa_0$  und  $\vartheta$  Konstanten darstellen [10]. Die elektrische Leitfähigkeit des SF<sub>6</sub> Gases wird in den meisten veröffentlichten Arbeiten als konstant definiert [12], [14]. Hier wird die elektrische Leitfähigkeit jedoch wie (7) als nichtlineares Modell beschrieben, welches in [15] aus Messdaten hergeleitet wurde. Die Gleichung, die die nichtlineare elektrische Leitfähigkeit von SF<sub>6</sub> beschreibt, ist gegeben durch

$$\begin{aligned} \kappa(|\vec{E}|, P, T) = & \kappa_{\text{SF}_6} \cdot (\alpha + \beta \cdot (\gamma + \\ & |\vec{E}|/E_x)^c) \cdot (1/(Q + \epsilon \cdot |\vec{E}|/E_x)^d) \\ & \cdot \exp(\zeta \cdot P) \cdot \exp(v \cdot T), \end{aligned} \quad (8)$$

Wobei  $\kappa_{SF6}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $E_x$ ,  $\zeta$ ,  $q$ ,  $\epsilon$ ,  $E_y$ ,  $\iota$ ,  $v$  und  $\zeta$  Konstanten darstellen und  $P$  den Gasdruck. Das Modell ermöglicht es, die Auswirkungen verschiedener Parameter auf die elektrische Leitfähigkeit des Isoliergases zu berücksichtigen, die vernachlässigt werden, wenn die elektrische Leitfähigkeit als konstant definiert wird. Dieser Ansatz stellt ein gekoppeltes elektrothermisches Modell zur Berechnung des elektrischen Feldes in einer HVDC GIL dar.

## 2.2. Polymere Verbundstoffe als Feldsteuerungstechnik

Die frühesten Forschungen über nichtlineare Materialien lassen sich bis in die 1960er zurückverfolgen [9]. Füllstoffe mit nichtlinearer elektrischer Leitfähigkeit werden in ein polymeres isolierendes Material eingesetzt, um einen polymeren Verbundwerkstoff herzustellen. Im Fall von gasisolierten Rohrleitern handelt es sich bei dem isolierenden Material meist um gegossenes Epoxidharz, welches mit nichtlinearen Füllstoffen wie SiC (Siliciumcarbid), ZnO (Zinkoxid), GO (Graphenoxid), etc. gefüllt wird, um ein nichtlineares Verhalten der elektrischen Leitfähigkeit des Isoliermaterials über der elektrischen Feldstärke zu erreichen. Dieses Verhalten wird dabei von den Füllstoffen bestimmt. Die elektrische Leitfähigkeit dieser Materialien wird vor allem durch 4 Parameter beschrieben: Die Leitfähigkeit des Materials unter normalen Betriebsbedingungen bzw. bei geringen elektrischen Feldstärken ( $\kappa_0$ ), der Schwellenwert der elektrischen Feldstärke, ab der die elektrische Leitfähigkeit des Materials schnell ansteigt ( $E_a$ ), der Koeffizient für die Nichtlinearität ( $\alpha$ ), welche beschreibt wie schnell dieser Anstieg erfolgt und der Sättigungswert der elektrischen Feldstärke ( $E_b$ ), bei der die elektrische Leitfähigkeit wieder einen konstanten Wert annimmt [16], [17]. Diese Parameter hängen vom verwendeten Material der Füllstoffe ab. Die Nichtlinearität von ZnO ist bspw. deutlich höher als die von SiC [17]. Eine räumliche Verteilung von Füllstoffen mit konstanten Parametern, wie im Gleichspannungsfall die elektrische Leitfähigkeit, stellt die Feldsteuerungstechnik FGM dar. Das Grundkonzept der räumlichen Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit ist ein Anstieg ihrer Werte dort, wo die größten elektrischen Felder im gasisolierten System zu erwarten sind. Diese räumliche Verteilung kann durch unterschiedliche Methoden realisiert werden, indem die Füllstoffe z.B. gezielt durch eine Zentrifuge verteilt werden oder durch eine Schichtung von verschiedenen Isolationschichten des Epoxidharzes mit unterschiedli-

cher Füllpartikelanzahl [8], [18]. Die verwendeten Füllstoffe sind z.B. Kohlenstofffaser, Kohlenstoffnanoröhren oder leitfähige Polymere.

## 3. Elektrische Feldsimulationen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der elektrischen Feldsimulationen mit Anwendung von feldsteuernden Materialien in HVDC GIL vorgestellt. Simuliert werden 3 verschiedene nichtlineare Füllpartikel und eine FGM Anwendung. Die betrachteten nichtlinearen Füllpartikel sind ZnO Mikrovaristoren mit hoher Nichtlinearität, SiC und Iriotec® 7000 Partikel (Merck KGaA) [16], welche eine geringere Nichtlinearität aufweisen. In Abbildung 1 ist die Geometrie des achsensymmetrischen Modells einer HVDC GIL zu sehen und die numerischen Randbedingungen. Der Leiter hat ein Potential von 320 kV, das geerdete Gehäuse ein Potential von 0 kV und eine Temperatur von 300 K. Es liegt ein Temperaturgradient zwischen Leiter und Gehäuse von 35 K vor, da der Leiter eine Temperatur von 335 K hat. Diese Randbedingungen gelten für alle Simulationsszenarien.

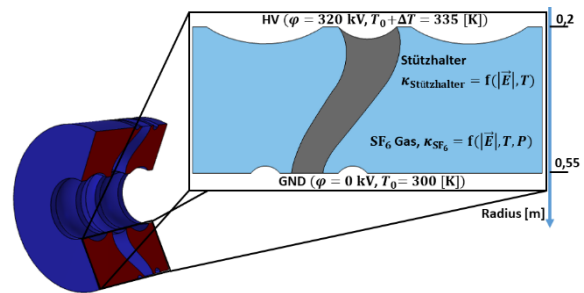


Abbildung 1: Geometrie der simulierten HVDC GIL.

### 3.1. HVDC GIL ohne Anwendung von Feldsteuerung

In Abbildung 2 ist die simulierte elektrische Feldverteilung in der HVDC GIL Geometrie aus Abbildung 1 zu sehen, ohne Anwendung von Feldsteuerungstechniken (Uniform). Es ist zu erkennen, dass hohe elektrische Feldstärken am Triple Point zwischen geerdetem Gehäuse, konvexer Seite des Stützhalters und Gas auftreten. Dies ist durch die eintretende Inversion des elektrischen Feldes im DC-Betrieb zu erklären, welche aufgrund der Ladungsakkumulation auftritt. Der maximale Wert der elektrischen Feldstärke liegt bei 7,77 kV/mm.

### 3.2. ZnO Mikrovaristoren

Die elektrische Leitfähigkeit über die elektrische Feldstärke von Epoxidharz gefüllt mit ZnO Mikrovaristoren ist in Abbildung 3 zu sehen. Die Leitfähigkeit zeigt dabei eine starke Nichtlinearität, bei der der Schwellenwert bei  $E_a = 1,2$

kV/mm und das Sättigungsfeld bei  $E_b = 4,8$  kV/mm liegt [15]. In Abbildung 4 ist die elektrische Feldstärkeverteilung mit Anwendung von ZnO Mikrovaristoren zu sehen. Verglichen mit Abbildung 2 (Uniform), ist die elektrische Feldbelastung am Triple Point deutlich gesunken. Dies ist auch am maximalen Wert zu erkennen, welcher von 7,77 kV/mm auf 5,29 kV/mm abgenommen hat, welcher damit eine Reduktion von 32 % darstellt.

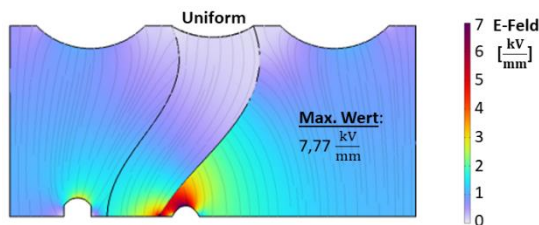


Abbildung 2: Elektrische Feldverteilung in HVDC GIL ohne Feldsteuerung.

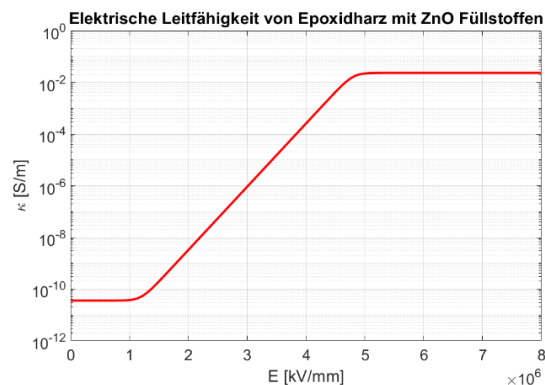


Abbildung 3: Elektrische Leitfähigkeit über der elektrischen Feldstärke von Epoxidharz gefüllt mit ZnO Mikrovaristoren [16].

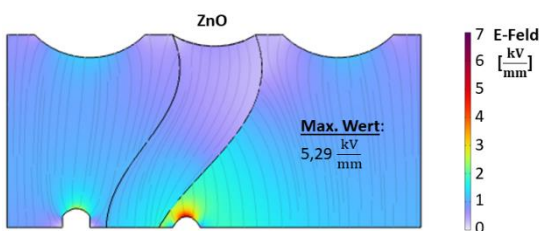


Abbildung 4: Elektrische Feldverteilung in HVDC GIL mit Anwendung von Epoxidharz gefüllt mit ZnO Mikrovaristoren [16].

### 3.3. SiC

In Abbildung 5 ist die elektrische Leitfähigkeit von Epoxidharz mit SiC Füllstoffen über der elektrischen Feldstärke zu sehen. Verglichen mit ZnO aus Abbildung 3, ist die Nichtlinearität deutlich geringer. Ebenfalls sind Messdaten zu sehen (blaue Sterne), aus denen das Modell (rote Linie) abgeleitet wurde [19]. In Abbildung 6 ist die elektrische Feldstärkeverteilung in HVDC GIL mit Anwendung von SiC zu sehen.

Verglichen mit Abbildung 2, bei der keine Füllstoffe als Feldsteuerung eingesetzt werden, ist die Feldstärkeverteilung geringer, aber verglichen mit den Ergebnissen, die ZnO Mikrovaristoren erzielt haben, höher. Dies verdeutlicht sich am maximalen Wert der elektrischen Feldstärke, welche hier 6,36 kV/mm beträgt und damit eine Reduktion von 18 % darstellt, verglichen mit dem maximalen Wert ohne Anwendung von feldsteuernden Materialien. Bei der Anwendung von ZnO werden jedoch 32 % Reduktion erzielt.

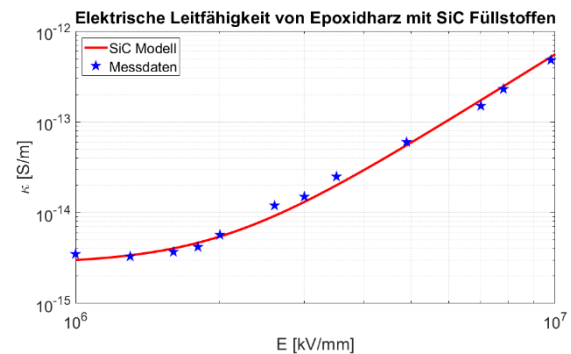


Abbildung 5: Elektrische Leitfähigkeit über der elektrischen Feldstärke von Epoxidharz gefüllt mit SiC [19].

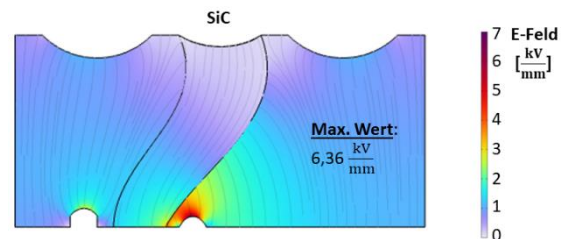


Abbildung 6: Elektrische Feldverteilung in HVDC GIL mit Anwendung von Epoxidharz gefüllt mit SiC [19].

### 3.4. Iriotec® 7000

Ein weiteres untersuchtes nichtlineares Isolationsmaterial sind Iriotec 7000 Partikel von der Firma Merck, welche eine mäßigere Nichtlinearität aufweisen. Messdaten zu der elektrischen Leitfähigkeit über der elektrischen Feldstärke von Epoxidharz mit Iriotec 7000 Füllstoffen sind in Abbildung 7 zu sehen (Blaue Sterne), aus denen das elektrische Leitfähigkeitsmodell für das Material hergeleitet wurde (Rote Linie) [15]. In Abbildung 8 ist die elektrische Feldstärkeverteilung mit Anwendung des Leitfähigkeitsmodells von Epoxidharz mit Iriotec 7000 Partikeln zu sehen. Iriotec 7000 bewirkt eine Senkung der elektrischen Feldstärkeverteilung und des maximalen Werts um 12,4 % von 7,77 kV/mm auf 6,8 kV/mm, verglichen mit dem Fall, dass keine Feldsteuerung angewendet wird (Abbildung 2).

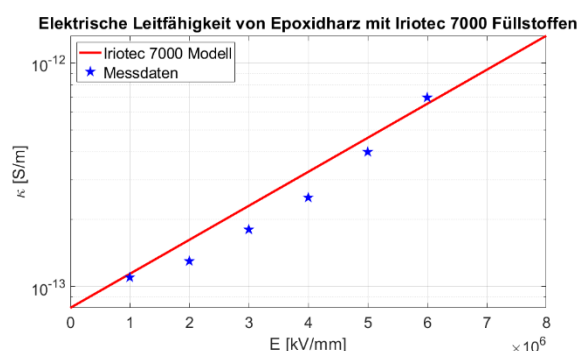


Abbildung 7: Elektrische Leitfähigkeit über der elektrischen Feldstärke von Epoxidharz gefüllt mit Iriotec 7000 Partikeln [16].

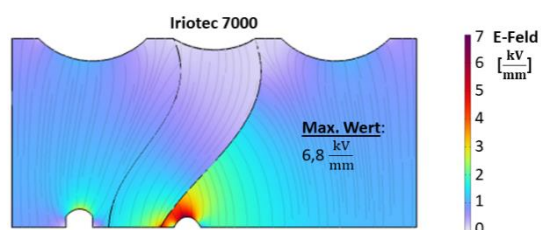


Abbildung 8: Elektrische Feldverteilung in HVDC GIL mit Anwendung von Epoxidharz gefüllt mit Iriotec 7000 Partikeln [16].

### 3.5. Functionally Graded Material (FGM)

Abschließend wird neben nichtlinearen Materialien ein FGM Stützhalter, welche eine räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit realisiert, untersucht. Die räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit über den Radius des Stützhalters ist in Abbildung 9 zu sehen, mit einer beispielhaften elektrischen Basisleitfähigkeit von  $\kappa = 1 \cdot 10^{-15} \text{ S/m}$ . An der Abbildung ist zu erkennen, dass die elektrische Leitfähigkeit an den Elektroden, also am Leiter und am Gehäuse, zehnmal größer ist als im Zentrum des Stützhalters. In der Anwendung wird das elektrische Leitfähigkeitsmodell des Stützhalters (7) mit dem Modell für FGM multipliziert, so dass unabhängig von den Parametern, von denen (7) nichtlinear abhängt, die elektrische Leitfähigkeit an den Elektroden zehnmal größer ist. In Abbildung 10 ist die elektrische Feldverteilung mit Anwendung des FGM Stützhalters in dem HVDC GIL Modell zu sehen. Der FGM Stützhalter bewirkt eine deutliche Senkung der elektrischen Feldstärkeverteilung, insbesondere am belasteten Triple Point. Der maximale Wert der elektrischen Feldstärke liegt bei 5,23 kV/mm, welches eine Senkung der maximalen elektrischen Feldstärke von 32,5 % darstellt, verglichen mit der Anwendung eines Stützhalters ohne Feldsteuerung (7,77 kV/mm).

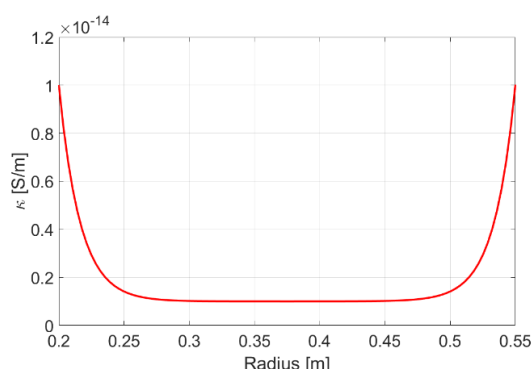


Abbildung 9: Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit des FGM-Stützhalters über den Radius mit einer Basisleitfähigkeit von  $\kappa = 1 \cdot 10^{-15} \text{ S/m}$ .

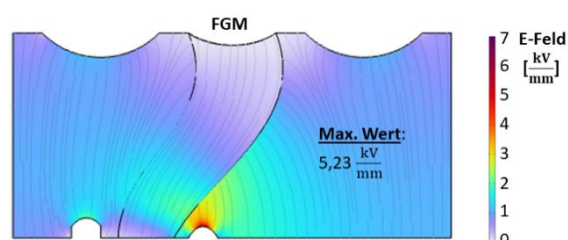


Abbildung 10: Elektrische Feldverteilung in HVDC GIL mit Anwendung von FGM im Stützhalter nach Abbildung 9.

### 3.6. Diskussion der Ergebnisse

In Tabelle 1 sind die maximalen elektrischen Feldstärkewerte für die untersuchten Feldsteuerungsanwendungen zusammengefasst. Ebenfalls ist die prozentuale Abweichung der einzelnen Anwendungen von der maximalen Feldstärke, die auftritt, wenn keine Feldsteuerungstechnik angewendet wird (Uniform), aufgeführt. Die geringste maximale elektrische Feldstärke von 5,23 kV/mm wird dabei von FGM erzielt, welche eine prozentuale Abweichung von -32,5% darstellt. Ähnliche Ergebnisse realisiert der ZnO Füllstoff. Die maximale Feldstärke beträgt hier 5,29 kV/mm und die prozentuale Abweichung -32%, also nur geringe Unterschiede zu FGM. Da FGM technisch schwierig zu realisieren ist, stellt damit der ZnO Füllstoff eine gute Alternative da, um die elektrische Feldstärke in HVDC GIL zu minimieren. Der Füllstoff SiC erreicht mit 6,36 kV/mm eine Abweichung von -18%, sowie Iriotec 7000 mit 6,8 kV/mm eine Abweichung von -12,5%.

Tabelle 1: Maximale Werte der elektrischen Feldstärke für die verschiedenen Anwendungen

| Anwendung    | Max. E-Feld | Prozentuale Abweichung von Uniform |
|--------------|-------------|------------------------------------|
| Uniform      | 7,77 kV/mm  | 0%                                 |
| ZnO          | 5,29 kV/mm  | -32%                               |
| SiC          | 6,36 kV/mm  | -18%                               |
| Iriotec 7000 | 6,8 kV/mm   | -12,5%                             |
| FGM          | 5,23 kV/mm  | -32,5%                             |

#### 4. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden Füllstoffe im polymeren Verbundwerkstoff im Stützhalter einer HVDC GIL durch numerische Simulationen untersucht. Dabei wurden 3 verschiedene Füllstoffe, ZnO, SiC und Iriotec 7000™, sowie ein FGM Stützhalter untersucht und der Einfluss auf die elektrische Feldstärke in der GIL bestimmt. Jede Anwendung bewirkt eine Senkung der elektrischen Feldstärkeverteilung, sowie des maximalen elektrischen Feldstärkewerts. Die größte Reduzierung der elektrischen Feldbelastung erreichen der FGM Stützhalter und der ZnO Füllstoff. Die Simulationsergebnisse deuten darauf hin, dass ZnO Füllstoffe eine Alternative zu FGM sein könnten, da die Fertigung von FGM Stützhaltern technisch schwierig zu realisieren ist.

#### Literatur

- [1] A. Küchler, Hochspannungstechnik: Grundlagen – Technologie – Anwendungen, 4. Aufl., Berlin, Springer Verlag, 2017.
- [2] Y. Luo et al., How Temperature and Pressure Affect the Electric Field Distribution in HVDC GIS/GIL: A Numerical Study, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 28, No. 4, 2021, S. 1334-1341.
- [3] N. Zebouchi und M. A. Haddad, A Review on Real-Size Epoxy Cast Resin Insulators for Compact High Voltage Direct Current Gas Insulated Switchgears (GIS) and Gas Insulated Transmission Lines (GIL) – Current Achievements and Envisaged Research and Development, Energies 2020.
- [4] J. Kindersberger und C. Lederle, Surface Charge Decay on Insulators in Air and Sulphurhexafluoride – Part I: Simulation, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 15, No. 4, 2008, S. 941-948.
- [5] ABB, Preparing for the imminent F-gas regulation with low pressure SF6-free medium voltage gas insulated switchgear, 2022.
- [6] L. Zavattoni, Conduction Phenomena Through Gas and Insulating Solids in HVDC Gas Insulated Substations, and Consequences on Electric Field Distribu-

tion, Dissertation, Electric Power, Université de Grenoble, 2014.

- [7] R. Bodega, Space Charge Accumulation in Polymeric High Voltage Cable Systems, Dissertation, Technische Universität Delft, 2006.
- [8] N. Hayakawa, Y. Miyaji, H. Kojima, Simulation on Discharge Inception Voltage Improvement of GIS Spacer with Permittivity Graded Materials Using Flexible Mixture Casting Method, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 25, No. 4, 2018, S. 1318-1323.
- [9] W. Pan et al., Nonlinear Materials Applied in HVDC Gas Insulated Equipment: From Fundamentals to Applications, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. Vol. 28, No. 5, 2021, S. 1588-1602.
- [10] N. Hayakawa et al., Electric Field Grading by Functionally Graded Materials (FGM) for HVDC Gas Insulated Power Apparatus, IEEE CEIDP, 2018, S. 309-312.
- [11] B. Du et al., Multidimensional Functionally Graded Materials ( $\epsilon/\sigma$ -FGM) for HVDC GIL/GIS Spacers, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 29, No. 5, 2022, S. 1966-1972.
- [12] A. De Lorenzi et al., Modeling of Epoxy Resin Spacers for the 1 MV DC Gas Insulated Line of ITER Neutral Beam Injector System, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 16, No. 1, 2009, S. 77-87.
- [13] Spitzner, VDI Wärmeatlas, Berlin, Springer Verlag, 2013.
- [14] Z. Wu et al., Study on Electric Field Distortion Effect by Linear Defects of Tri-Post Insulator, IEEE CEIDP, 2018, S. 195-198.
- [15] H. Hensel et al., Numerical Simulation of Electric Field Distribution in HVDC Gas Insulated Lines Considering a Novel Nonlinear Conductivity Model for SF6, VDE Hochspannungstechnik, Berlin, 2022, S. 229-234.
- [16] H. Li et al., Theoretical and Practical Investigations of Spacer Models for Future HVDC GIL/GIS Applications, Springer Nature Switzerland, 2020, S. 1538-1549.
- [17] M. Pradhan et al., Functional Behaviors of Electric Field Grading Composite Materials, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 23, No. 2, 2016, S. 768-777.
- [18] N. Hayakawa et al., Fabrication and Simulation of Permittivity Graded Materials for Electric Field Grading of Gas Insulated Power Apparatus, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 23, No. 1 2016, S. 547-553.
- [19] H. Liang et al., Effects of Nonlinear Conductivity on Surface Charge Characteristics of Epoxy/SiC Composites under DC Stress, IEEE ICPADM, 2018.