

Dielektrische Festigkeit verschiedener Gase in GIS

H. Rebholz, W. Köhler, S. Tenbohlen, Universität Stuttgart

Kurzfassung

Aus ökologischen und ökonomischen Gründen wird seit längerem versucht das reine SF₆ als Isoliermedium in metallgekapelten gasisolierten Schaltanlagen (GIS) durch SF₆-Mischungen und alternative Isoliergase zu ersetzen. Für die Auswahl eines umweltfreundlichen und wirtschaftlichen Gases, sowie für die dielektrische Auslegung der GIS, sind Schott- bzw. Stützisolatoren von großer Bedeutung. Sie stellen im ungünstigsten Fall sensible Schwachstellen für die gesamte Isolation dar. Maßgebend für die Beurteilung der Durchschlagsfestigkeit der GIS ist daher unter anderem der Zustand der Grenzfläche vom Isoliergas zur Feststoffisolation. Eine weitere Beeinflussung der Durchschlagsfestigkeit ergibt sich durch anhaftende, leitfähige Partikelverunreinigungen, wie sie z.B. durch Abrieb in bewegten Teilen innerhalb der GIS auftreten können. Zur Reduktion des in der Energietechnik verwendeten SF₆-Anteils werden CO₂, N₂ und Druckluft als Alternativen zu SF₆, anhand eines Druckbereichs von 0,1 bis 1 MPa, in GIS auf ihre Isolierfestigkeit überprüft.

1 Einleitung

1.1 SF₆ als umweltgefährdendes Treibhausgas

Das Isoliergas SF₆ hat seit seiner Einführung ein breites Spektrum an Anwendungen in der elektrischen Energieübertragung erschlossen.

Allerdings wurde man bereits in den neunziger Jahren auf das immense Treibhausgaspotential (GWP Global Warming Potential) von SF₆ aufmerksam. Kalkulationen ergeben einen GWP Index für SF₆ von ca. 24.000 CO₂ Massenäquivalente [1]. Für die Umsetzung des im Protokoll von Kyoto ratifizierten Vertrages, zur Reduzierung fluoriertem Treibhausgasen, ist auch eine erhebliche Reduktion des in der BRD verwendeten Anteils an SF₆ vorgesehen. Vorgaben dazu gehen aus dem Eckpunktpapier -Umsetzung des nationalen Klimaschutzprogramms im Bereich der fluorierten Treibhausgasen-, herausgegeben vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, hervor. Dies sieht eine Reduzierung der fluorierten Treibhausgasen um 21%, in der ersten Verpflichtungsperiode von 2008-2012, gegenüber 1990 vor.

1.2 Stand der Technik

Bereits heute wird versucht SF₆ in gasisolierten Schaltanlagen durch Gasgemische mit geringem SF₆-Anteil zu ersetzen. Hervorgehoben haben sich dabei SF₆/N₂ und SF₆/CO₂ Mischgase für GIL und GIS. Allerdings weisen Mischgase eine höhere Empfindlichkeit für Partikelverunreinigungen mit steigendem Gasdruck bzw. sinkendem SF₆-Volumenanteil auf [9]. Für GIL können Mischgase mit einem SF₆ Anteil von ca. 5% angestrebt werden, da

sie keine Schaltelemente beinhalten und somit kaum eine Gefahr durch Verunreinigungen besteht.

Für eine Beurteilung der nachfolgend betrachteten Gase ist somit zum einen die elektrische, druckabhängige Festigkeit, sowohl als auch ihr Verhalten bei einer Störung durch Partikel in der GIS, zu betrachten.

2 Elektrische Festigkeit gasförmiger Isolierstoffe

Ohne äußere Energiezufuhr sind unter Normalbedingungen praktisch keine freien Elektronen im Isoliergas zum Ladungstransport vorhanden. Erst durch die Anwesenheit freier Elektronen, welche zur Lawinenbildung benötigt werden, kann ein Durchschlagsprozess im Isoliergas eingeleitet werden. Je nach Anzahl freier Elektronen tritt im nicht mehr neutralen Isoliergas ab einem bestimmten Spannungswert eine plötzliche Änderung der elektrischen Leitfähigkeit ein. Die schnelle Änderung der Isoliereigenschaften hat den sofortigen Zusammenbruch der angelegten Spannung zur Folge, welcher als elektrischer Durchschlag im Isoliergas bezeichnet wird.

Neben der Erd- oder Höhenstrahlung sind weitere Quellen bekannt, die das zur Lawinenbildung freie Elektron bereitstellen können.

Dies sind im Weiteren die:

- äußere Feldemission
- äußere Photoemission
- äußere Thermoemission.

Das im Gasraum bereitgestellte Anfangselektron wird im elektrischen Feld beschleunigt und stößt nach Durchlaufen seiner mittleren freien Weglänge mit einem neutralen Molekül des Isoliergases zusammen. Je nach Höhe der kinetischen Energie des angeregten Elektrons und des beim Zusammenstoß übertragenen Energieanteils, wird das Elektron angelagert (Elektronenanlagerung) oder ein angelagertes Elektron abgelöst. In reinem SF₆ bilden sich bei Elektronenanlagerung stabile negative SF₆ Ionen, die wiederum mit bereits existierenden positiven SF₆-Ionen rekombinieren können (Ion-Ion-Rekombination). Zur Ablösung angelagerter Elektronen sind die Prozesse von

- Selbstablösung (auto detachment)
- Ablösung durch Photoenergie (photo detachment)
- Stoßionisation (collision detachment)

wirksam. Die Stoßionisation stellt dabei im elektrischen Feld den weitaus größten Teil der Anfangselektronen zur Verfügung [2]. Abhängig von den im Gasvolumen vorherrschenden elektrischen Feldverhältnissen, lassen sich die weiteren Durchschlagsmechanismen in zwei Typen aufteilen, den reinen Streamerdurchschlag im Homogenfeld und den Streamer-Leader-Durchschlag in stark inhomogenen Feldanordnungen.

2.1 Der Durchschlagsprozess im Homogenfeld

Bei Überschreiten der gasspezifischen kritischen Feldstärke erreicht der Anlagerungs- bzw. Ionisierungsvorgang einen Punkt, ab dem die Ionisierung überwiegt (effektiver Ionisierungskoeffizient $\alpha_{\text{eff}} > 0$)- es können sich Elektronenlawinen ausbilden, wobei die Anzahl freier Elektronen im Volumen exponentiell zunimmt. Überschreitet die erzeugte Elektronenzahl im Lawinenkopf den Wert $N_k = 10^8$, bildet sich ein Streamer aus, der im Homogenfeld sofort zum Durchschlag führt da im gesamten Volumen die kritische Feldstärke herrscht [3]. Aufgrund dem Massenverhältnis von Elektron zu Ion, wandern die Elektronen schnell zur Anode ab und lassen dabei die langsamen Ionen am Entstehungsort zurück. Durch diese Ionen kommt es zu einer Veränderung des Grundfeldes, was zu weiteren Anregungsprozessen im Lawinenkopf führt. Erreicht der Streamer die Gegenelektrode, wird dieser innerhalb kurzer Zeit aufgeheizt und thermisch ionisiert. Dieser nun hochleitende Streamerkanal führt im Folgenden zum Streamerdurchschlag.

2.2 Der Durchschlagsprozess im stark inhomogenen Feld

Für inhomogene Feldverhältnisse muss bei negativer Störstelle oder Elektrode zusätzlich die Elektronenbereitstellung durch Feldemission an der metallischen Oberfläche beachtet werden [4]. Da die kritische Feldstärke in ihrer räumlichen Ausdehnung durch den divergenten Feldverlauf begrenzt wird, ist die Voraussetzung für eine konstante Vorwachsbedingung der Elektronenlawine nicht gegeben. Damit wird ein reiner Streamerdurchschlag verhindert. Es kommt dagegen zu einer kombinierten Entladungsentwicklung die sich aus Streamer-Ausbildung und den nachfolgenden, so genannten Leaderschritten zusammensetzt. Das schwach leitfähige Streamergebiet geht dabei in einen dissoziierten, hochleitfähigen Kanal über (Percursormechanismus). Dieser Effekt kommt besonders bei transients Spannungbeanspruchung hervor. Handelt es sich bei der Beanspruchung jedoch um eine sich langsam ändernde Spannung, wie sie bei der Betriebswechselspannung auftritt, kommt vor allem die Koronastabilisierung als feldstabilisierender Effekt zum tragen.

2.3 Einfluss des Gasdruckes auf den Durchschlagsvorgang

Entscheidender Einfluss auf die Bereitstellung einzelner Anfangselektronen hat die mittlere freie Weglänge eines Elektrons. Je höher die Dichte des Gases, desto geringer ist die freie Weglänge die ein Elektron im Feld zurücklegen kann. Somit kann das Elektron bei steigendem Druck und gleich bleibenden Feldverhältnissen nur eine geringere kinetische Energie zwischen den Stößen erhalten, was zu einer Steigerung der elektrischen Festigkeit führt. Gegenläufig dazu wirkt jedoch die Oberflächrauigkeit der Elektroden, womit ab einem Druckbereich von ca. 0,7-0,9 MPa keine lineare Steigerung der Durchschlagsspannung mehr möglich ist.

2.4 Überschlag an der Grenzfläche Isoliergas/Feststoff

Um eine ausreichende elektrische Festigkeit der GIS zu erhalten, müssen dielektrische Oberflächen an Stützisolatoren entsprechend dimensioniert werden. Aufgrund angelagerter Oberflächenladungen können Feldverzerrungen auftreten, die die Festigkeit erheblich herabsetzen [5].

Leitfähige Partikel auf Stützern stellen aufgrund ihrer intensiven Teilentladungsaktivität eine große Zahl freier Ladungsträger zur Verfügung. Die Partikel lagern sich entlang der Feldlinien auf der Stützeroberfläche an und verzerren das bereits gestörte Grundfeld zusätzlich. Durch die wesentlich höhere Dielektrizitätskonstante des Stützermaterials gegenüber dem Isoliergas, kommt es bereits während der Annäherung des Partikels an den Stützer zu einer Feldstärkeüberhöhung auf der Isolatoroberfläche, dem so genannten Proximity-Effekt, welches zu einer Reduzierung der elektrischen Festigkeit führt.

3 Versuchsaufbau

3.1 Modellanordnung

Die Modellanordnung setzt sich aus einem Modellstützer und einem Prüfeinsatz zusammen (Bild 1). Ohne metallische Verunreinigung ergibt sich die Durchschlagsfeldstärke im Homogenfeld an der Grenzfläche von Isoliergas/Feststoffisolator. Bei der Simulation von in GIS auftretenden Störpartikeln ist ein 4mm langer NiCr Draht (\varnothing 0,2 mm) in der Mitte des Stützers mit Silikon angebracht. Die gesamte Anordnung besteht aus zwölf Modellstützern (Prüfeinsätzen), welche in einer Elektrodenanordnung mit Rogowski-Profil untergebracht sind.

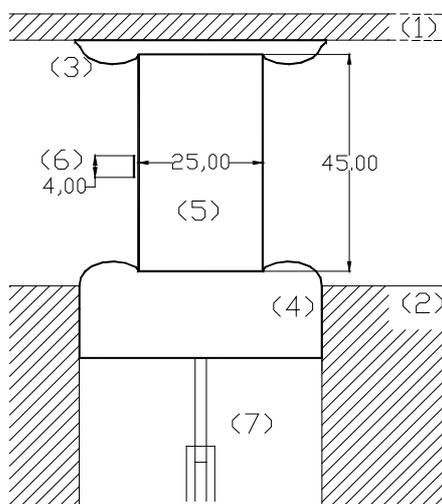


Bild 1 Prüfeinsatz mit Modellstützer

- 1: Hochspannungsseite, 2: Erdseite
- 3: Hochspannungselektrode, 4: Erdelektrode
- 5: Stützisolator, 6: Partikel, 7: Antrieb

Die als Feststoffisolator verwendeten Modellstützer sind zylindrisch, mit einem Durchmesser von 25 mm und einer Höhe von 45 mm. Sie bestehen aus Epoxidharz mit Aluminiumoxyd (Al_2O_3) als Füllstoff.

Für jeden Probeneinsatz erzeugen zwei aus V2A-Stahl hergestellte Elektroden ((3), (4)) mit Rogowski-Profil das jeweilige Homogenfeld der Modellumgebung. Die komplette Modellanordnung ist in einem zylindrischen Versuchsgefäß untergebracht, welches Arbeiten bei Gasdrücken bis zu 1,4 MPa erlaubt.

3.2 Erzeugung und Messung der Prüfspannungen

Bild 2 zeigt den Gesamtaufbau der Versuchsanlage. Die Prüfspannungen werden durch einen einphasigen Hochspannungstransformator (380V/510 kV, 50 Hz) sowie einen achtstufigen Marx'schen Stoßgenerator, der Prüfungen mit Blitzstoßspannung gemäß DIN VDE 0432-2 bis zu einer Amplitude von 800 kV erlaubt, erzeugt.

Bei der Wechselspannungsprüfung wird die Spannung mit ca. 6 kV/s bis zum Durchschlag gesteigert. Zur Abschaltung der Wechselspannung nach einem erfolgten Durchschlag steht eine Schnellabschaltung auf der Primärseite zur Verfügung, die gleichzeitig die Eingänge des Transformators kurzschließt.

Damit wird ein erneutes Durchzünden der Versuchsanordnung verhindert.

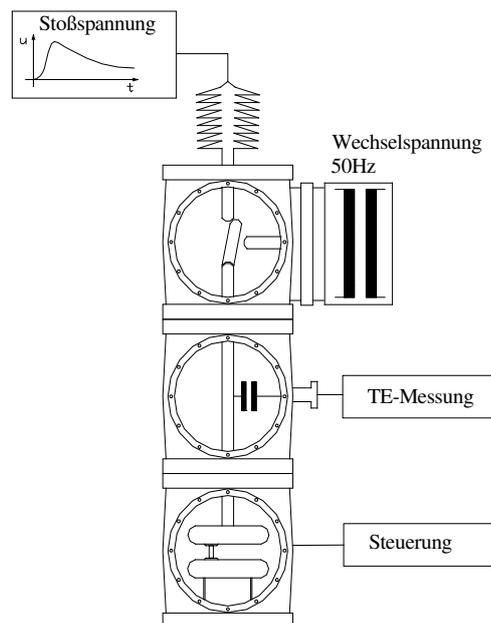


Bild 2 Versuchsaufbau

Auftretende transiente Spannungsverläufe werden über einen kapazitiven Hochspannungsteiler erfasst, wobei die Wechselspannung über einen kapazitiven Messbelag, der im Hochspannungstransformator integriert ist, gemessen wird.

3.3 Bestimmung der Überschlagsfeldstärke

3.3.1 Feldverteilung in der Modellanordnung

Wesentlicher Einflussfaktor für die Gasentladung ist der Verlauf des elektrischen Feldes. Die Simulation der Feldverhältnisse zeigt den bezogenen Potentialverlauf der Elektroden mit Prüfkörper (Bild 3).

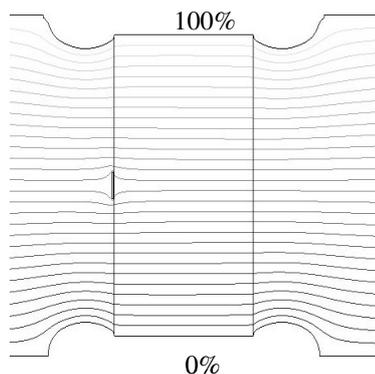


Bild 3 Potentialverteilung entlang eines Stützers

Im Weiteren wird für die elektrische Festigkeit die physikalische Größe der Durchschlagsfeldstärke verwendet. Dadurch lassen sich die Messungen mit Ergebnissen aus Untersuchungen mit ähnlicher Geometrie vergleichen. Die Überschlagsfeldstärke $E_{ü}$ kann aus der gemessenen Überschlagsspannung $U_{ü}$ über einen konstanten Faktor $k_{ü}$ errechnet werden.

$$E_{ü} = k_{ü} \times U_{ü}$$

Die geometrieabhängige Größe $k_{ü}$ ist für die gezeigte Anordnung aus Feldsimulationen errechnet worden [6]. $k_{ü}$ stellt dabei ein Maß für die Hintergrundfeldstärke ohne das feldverzerrende Partikel dar.

3.3.2 Einfluss der Oberflächenrauigkeit

Feldüberhöhungen, hervorgerufen durch die Oberflächenrauigkeit der Elektroden, können zu einer erheblichen Reduktion der Streamer-Einsatzspannung führen. Die auftretende Feldüberhöhung kann jedoch nicht analytisch erfasst werden, womit nur eine Abschätzung der Beeinflussung erfolgt.

Für den vorliegenden Versuchsaufbau wurden Elektroden mit einer gemittelten Rauhtiefe von ca. $1,2 \mu\text{m}$ verwendet, womit kein Einfluss auf das Durchschlagsverhalten zu erwarten ist [7].

Um die Rauhtiefe $< 10 \mu\text{m}$ der Elektroden während der Versuchsdurchführung zu erhalten, werden die verwendeten Elektroden in regelmäßigen Abständen poliert. Während der Beanspruchung mit Blitzstoßspannung entstehen durch Abbrand der Partikel Einschlagsspuren an den Elektroden, wie sie in Bild 4 zu sehen sind. Sämtliche Spuren aus vorhergegangenen Versuchen müssen entfernt werden, um zusätzlichen TE-Quellen vorzubeugen. Weiterhin wird damit eine Unabhängigkeit der Einzelversuche gewährleistet.

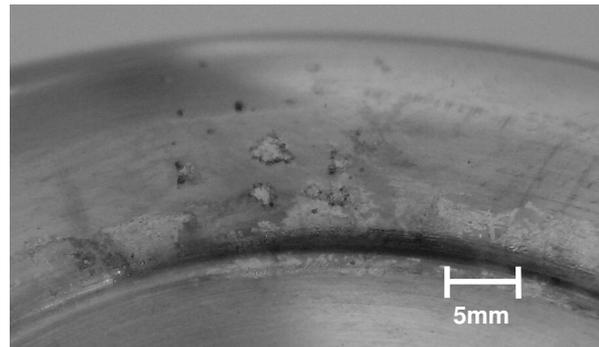


Bild 4 Durchschlagsspuren auf der Erdelektrode

4 Versuchsergebnisse

4.1 Versuchsdurchführung

Zur Bestimmung der mittleren Überschlagsspannung $U_{ü,m}$ bzw. Durchschlagsfeldstärke $E_{ü,m}$ wurden jeweils 8-12 Versuche pro Überschlagesperiment durchgeführt. Alle Werte der Durchschlagsfeldstärken beziehen sich auf den jeweils ermittelten Scheitelwert der angelegten Spannung, mit dem dazugehörigen Vertrauensbereich nach der Student-Verteilung. Der jeweils angegebene Gasdruck des Isoliergases ist als Absolutdruck [MPa] aufgetragen.

4.2 Überschlagsfeldstärke am Stützer bei Belastung mit Wechselspannung

Abbildung 5 zeigt die Durchschlagsfeldstärken der Isoliergase N_2 , CO_2 und Druckluft als Funktion des Gasdruckes ohne metallische Partikelverunreinigung. Die elektrische Festigkeit der Anordnung steigt dabei monoton mit wachsendem Gasdruck.

N_2 und Druckluft weisen kaum Unterschiede in ihrer elektrischen Festigkeit auf. Stickstoff dagegen bleibt über dem gesamten Druckbereich von 0,1 bis 1 MPa weit unter der Durchschlagsfeldstärke von N_2 bzw. Druckluft.

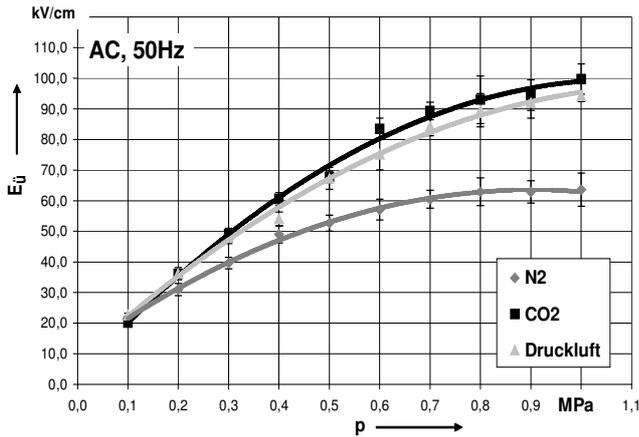


Bild 5 Überschlagsfeldstärke als Funktion des Gasdruckes in N₂, CO₂ und Druckluft ohne Partikel

Bei der Modellanordnung mit Metallpartikel bringt die leitende Verunreinigung eine deutliche Herabsetzung der Überschlagsspannung und damit auch der Überschlagsfeldstärke mit sich. Das Ausmaß der Absenkung ist im Allgemeinen von der Spannungsart, sowie vom Feldverlauf in der Anordnung abhängig [8].

Abbildung 6 zeigt die Überschlagsfeldstärke der Anordnung bei einer Verunreinigung mit einem 4 mm langen NiCr Draht in der Mitte des Stützers.

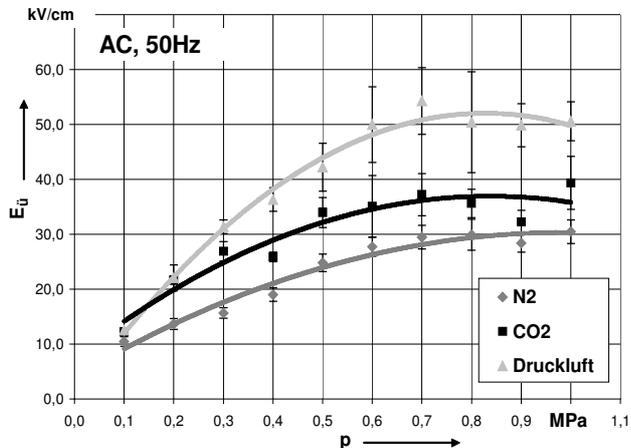


Bild 6 Überschlagsfeldstärke als Funktion des Gasdruckes in N₂, CO₂ und Druckluft mit Partikel

Wie aus Bild 6 zu erkennen ist, verursacht der Metallpartikel an der Oberfläche des Stützers eine starke Absenkung der elektrischen Festigkeit bei einer Beanspruchung mit Wechselspannung. Im direkten Vergleich der Isoliergase zeigt CO₂ die höchste Absenkung der Durchschlagfeldstärke. Für CO₂ und Druckluft erfolgt keine Steigerung mehr der Durchschlagsspannung ab einem Gasdruck von 0,6 MPa.

4.3 Überschlagsfeldstärke am Stützer bei Belastung mit Blitzstoßspannung

Bei der Beanspruchung mit positiver Blitzstoßspannung 1,2/50 lagern sich Oberflächenladungen auf der partikelverunreinigten Oberfläche bereits dann an, sobald die TE-Einsatzspannung überschritten ist und kein Überschlag auftritt.

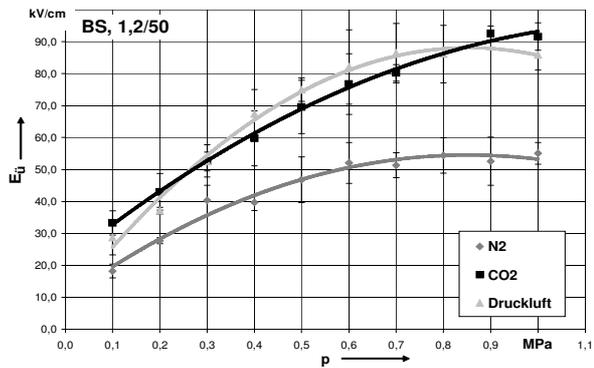


Bild 7 Überschlagsfeldstärke als Funktion des Gasdruckes in N₂, CO₂ und Druckluft mit Partikel

Zur Ermittlung der Durchschlagfeldstärke in Bild 7 wurde die Spannung schrittweise bis zum Durchschlag gesteigert, womit mit einer Erhöhung der Durchschlagfestigkeit aufgrund vorhandener Oberflächenladungen zu rechnen ist. Es sind weitere Untersuchungen zum Entladungseinsatz in CO₂, Druckluft und N₂ nötig, um eine vergleichbare Aussage über deren Festigkeit bei Beanspruchung mit Blitzstoßspannung zu machen.

4.4 Elektrische Festigkeit von SF₆/N₂-Mischgasen

Nachfolgend ist die elektrische Festigkeit von SF₆/N₂ dargestellt. Der SF₆-Anteil des Mischgases enthält 5%. Die Modellanordnung entspricht dabei dem bereits oben beschriebenen Aufbau.

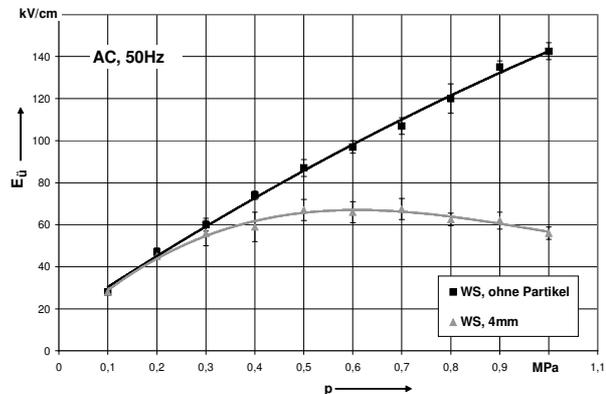


Bild 8 Überschlagsfeldstärke von 95%N₂+5%SF₆ als Funktion des Gasdruckes [9]

Auch SF₆-Isolationen erfahren eine deutliche Herabsetzung ihrer elektrischen Festigkeit aufgrund vorhandener Partikelverunreinigungen. Das SF₆/N₂-Mischgas zeigt eine Reduktion seiner elektrischen Festigkeit bei Wechselspannung von über 50% ab einem Gasdruck von 0,8 MPa.

4.5 Druckluft und CO₂ im Vergleich mit 5%SF₆+95%N₂-Mischgas

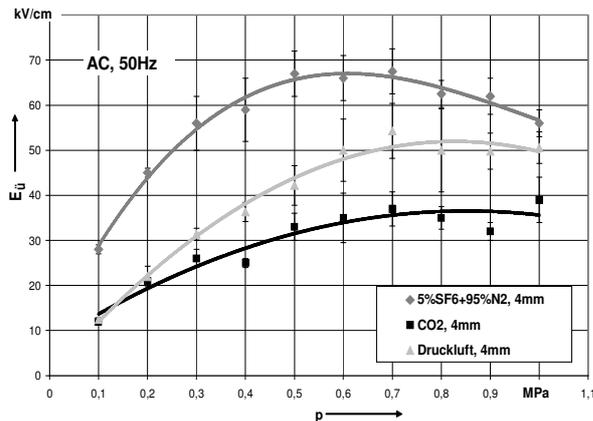


Bild 9 Durchschlagsfeldstärke von Druckluft, CO₂ und 5%SF₆+95%N₂ bei Wechselspannung mit Partikel

Im direkten Vergleich der Isoliergase, bei einer Beanspruchung mit Wechselspannung und anhaftendem Partikel, zeigt CO₂ die höchste Absenkung der elektr. Festigkeit mit einer Reduktion von über 50% ab 0,4 MPa Gasdruck. Das SF₆/N₂ Mischgas weist annähernd eine lineare Absenkung von 7-9 % pro 0,1 MPa über den gesamten Druckbereich auf, in Relation zur Isolierfestigkeit der partikelfreien Anordnung in Bild 8.

Die Festigkeit des reinen Stickstoffs liegt bei allen Durchschlagsversuchen weit unterhalb der anderen Gase, womit er an dieser Stelle nicht weiter betrachtet wird.

5 Zusammenfassung

Die Durchschlagsversuche mit den verschiedenen Gastypen zeigen die Durchschlagsfeldstärke an der vorgestellten Modellanordnung auf. Wie erwartet steigt die Durchschlagsspannung aller Gase monoton mit wachsendem Gasdruck.

Bei Versuchen mit Betriebswechselspannung zeigt CO₂ die höchste Beeinflussung durch eine anhaftende Partikelverunreinigung.

Für die Beanspruchung mit positiver Blitzstoßspannung ergeben sich für CO₂ und Druckluft kaum Unterschiede in ihrer elektrischen

Festigkeit über den gesamten Druckbereich von 0,1 bis 1 MPa.

Der reine Stickstoff zeigt bei allen Versuchen die geringste Festigkeit, bezogen auf CO₂ und Druckluft. Die starke Absenkung gegenüber Druckluft bedarf allerdings weiterer Untersuchungen der stattfindenden Durchschlagsmechanismen, da sich die verwendete Druckluft aus über 80% Stickstoff zusammensetzt. Durch Zugabe einer geringen Menge an SF₆ wird die Durchschlagsfeldstärke von N₂ in SF₆/N₂-Gasmischen erheblich gesteigert.

Soll komplett auf den Einsatz von SF₆ bzw. von SF₆ in Mischgasen verzichtet werden, stellen Druckluft und CO₂ unter erhöhtem Druck eine Alternative dar. Jedoch ist die erheblich geringere elektrische Festigkeit, sowie der steigende Einfluss auf Verunreinigungen im Design der Anlagen zu berücksichtigen.

6 Literatur

- [1] IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, 1999
- [2] Olthoff J.K.; Van Brunt R.J.; Wang Y.; Champion R.; Doverspike L.: Collisional Electron Detachment and Decomposition Rates of SF₆, SF₅ and F-SF₆. J. Chem. Phys. 91, 1989
- [3] Pedersen A.; McAllister W.; Crichton G.C.; Vibholm S.: Formulation of the streamer breakdown criterion and its application to strongly electronegative gases and gas mixtures. Archiv für Elektrotechnik 67, Springer Verlag, 1984
- [4] Dietrich K.J.: Untersuchungen zur Durchschlagsentwicklung in einer schwach inhomogenen Anordnung in SF₆ bei Beanspruchung mit Blitzstoßspannung. Dissertation RWTH Aachen, 1985
- [5] Tenbohlen S.: Der Einfluß dielektrischer Oberflächen auf die Durchschlagsentwicklung in einer störstellenbehafteten SF₆-Anordnung. Dissertation RWTH Aachen, 1997
- [6] Schurer R.: Der Einfluss von Störstellen auf Stützeroberflächen auf die elektrische Festigkeit von Isolieranordnungen in SF₆-isolierten Anlagen. Dissertation Universität Stuttgart, 1999
- [7] Mosch W.; Hauschild W.: Hochspannungsisolierungen mit SF₆. VEB Verlag Technik, Berlin 1979
- [8] Sudarshan T.S.; Dougal R.A.: Mechanisms of surface flashover along solid dielectrics in compressed gases: A review. IEEE Trans. On Electr. Insul. El-21, Nr5, 1986
- [9] Moukengue I.: Beeinflussung der elektrischen Festigkeit von N₂/SF₆- und Luft/SF₆ Isolationen durch Metallpartikel auf der Stützeroberfläche. Dissertation Universität Stuttgart, 2001