

Durchschlagverhalten des Schichtdielektrikums aus gasförmigem und flüssigem SF₆

Autor(en): **Beyer, M. / Bläsig, H.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **72 (1981)**

Heft 21

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-905165>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Durchschlagverhalten des Schichtdielektrikums aus gasförmigem und flüssigem SF₆

Von M. Beyer und H. Bläsig

621.317.333.6;

Der Beitrag behandelt Untersuchungen zum Einfluss von kondensiertem SF₆ auf die Durchschlagfestigkeit einer SF₆-Gasstrecke im quasi-homogenen elektrischen Feld.

Cet exposé traite des recherches sur l'influence du SF₆ condensé sur la rigidité diélectrique d'une épaisseur de gaz de SF₆ dans un champ électrique quasi-homogène.

1. Einleitung

Da die Durchschlagfeldstärke eines gasförmigen Dielektrikums mit zunehmender Gasdichte ansteigt, sind für eine optimale elektrische Ausnutzung möglichst hohe Drücke anzustreben. Dabei stellt allerdings die Sättigungsgasdichte, bei der die Kondensation einsetzt, eine obere Grenze dar, die für Schwefelhexafluorid (SF₆) bei tiefen Temperaturen schon bei geringen Gasdichten erreicht wird.

Durch eine bei Temperaturabsenkung einsetzende Kondensation von SF₆ nimmt in einem geschlossenen System die ursprünglich konstante Gasdichte und damit verbunden die elektrische Festigkeit des SF₆ kontinuierlich ab, und es bildet sich ein Zweiphasendielektrikum aus flüssigem SF₆ (LSF₆) und gesättigtem SF₆-Dampf [1; 2]. Infolge der im Vergleich zum gasförmigen SF₆ höheren Dielektrizitätszahl des LSF₆ führt die Kondensation zusätzlich zu einer Veränderung der ursprünglichen Feldverteilung.

Während zum elektrischen und dielektrischen Verhalten der Einzelkomponenten LSF₆ und SF₆ einige Untersuchungen, jedoch zumeist oberhalb 0 °C, durchgeführt wurden [3...7], ist den Autoren lediglich eine Veröffentlichung [8] bekannt, die sich mit dem elektrischen Verhalten des Zweiphasendielektrikums befasst. Dessen Eigenschaften können aber, wie der Einfluss leitender Feldstörungen gezeigt hat [9; 10], für SF₆-Anlagen, bei denen aufgrund absinkender Umgebungstemperatur eine Kondensation erfolgen kann, von entscheidender Bedeutung sein. Daher wurden zur Klärung des Einflusses nicht leitfähiger Feldstörungen auf die Festigkeit einer quasihomogenen Modellanordnung Untersuchungen bei unterschiedlichen LSF₆-Höhen durchgeführt.

2. Messeinrichtungen und Versuchsdurchführung

Die Untersuchungen der verschiedenen SF₆-Zustände an der Phasengrenze gasförmig-flüssig erfolgten in einem druckfesten und temperierbaren Versuchsgefäß, das für Spannungen bis zu einem Scheitelwert von 700 kV ausgelegt war und in [11] näher beschrieben ist. Die für die Durchschlaguntersuchungen verwendete Platte-Platte-Anordnung mit einem Elektrodenabstand von 10 mm wurde zunächst durch mindestens 30 Durchschläge konditioniert, so dass bei den Messungen eine Rauhtiefe von $R_{\max} = 20 \mu\text{m}$ vorlag, ähnlich wie in technischen Anlagen. In dieser Anordnung wurden Untersuchungen an gasförmigem bzw. flüssigem SF₆ sowie einem senkrecht zur Feldrichtung geschichteten Dielektrikum aus SF₆ und LSF₆ bei unterschiedlicher Höhe des LSF₆-Pegels durchgeführt.

Für vergleichbare Bedingungen bezüglich der zu untersuchenden SF₆-Zustände wurden jeweils definierte Temperaturen

Die Untersuchungen, über die hier berichtet wird, wurden von Sprecher & Schuh AG, 5000 Aarau, unterstützt.

eingestellt, so dass im stationären Fall an der Phasengrenze auch stets gleiche thermodynamische Zustände herrschten (Tabelle I); denn im Zweiphasengebiet sind der Druck sowie die Gas- und Flüssigkeitsdichte lediglich von der Temperatur abhängig. Nach Erreichen der Versuchstemperaturen wurden die verschiedenen LSF₆-Höhen durch zusätzliches Auffüllen mit trockenem SF₆ aus der Gasflasche erreicht. Damit blieb die relative Feuchte bei allen Messungen unterhalb von 5%.

Bei allen Versuchen mit 50-Hz-Wechselspannung wurde die Hochspannung mit einer Geschwindigkeit von 290 kV/min bis zum Durchschlag gesteigert. Die Auswertung erfolgte durch Bildung des arithmetischen Mittelwertes mit Standardabweichung aus 8 aufeinanderfolgenden Durchschlägen, wobei für einen Vergleich mit den Stoßspannungsergebnissen im folgenden stets der Scheitelwert angegeben ist. Bei allen Blitzstossuntersuchungen wurde die Spannung von einem Wert aus, bei dem noch kein Durchschlag zu erwarten war, in Stufen von jeweils 20 kV so lange gesteigert, bis alle 5 Stöße einer Stufe zum Durchschlag führten. Für die Auswertung der Versuche wurden die sich aus den Messungen direkt ergebenden Werte der Stehstoßspannung und der 100%-Durchschlag-Stoßspannung sowie die mit Hilfe der linearen Regression berechnete 50%-Durchschlag-Stoßspannung herangezogen.

3. Ergebnisse der Untersuchungen

3.1 Verhalten des gasförmigen und flüssigen SF₆

Zur physikalischen Deutung des Durchschlagverhaltens des Zweiphasendielektrikums ist die Kenntnis der elektrischen Festigkeiten und Dielektrizitätszahlen der Einzelkomponenten erforderlich. Eine Gegenüberstellung der unter vergleichbaren Versuchsbedingungen erzielten Ergebnisse lässt erkennen (Fig. 1), dass die elektrische Festigkeit des LSF₆ ähnlich wie die des gasförmigen SF₆ mit zunehmender Gasdichte ansteigt, obwohl die Dichte der Flüssigkeit gleichzeitig abnimmt (Tab. I). Dieses Resultat ist gleichbedeutend mit einer Festigkeitsminderung bei abnehmender Temperatur. Dabei ergeben sich für LSF₆ bei 50-Hz-Wechselspannung um 5 bis 10%

Thermodynamische Zustandsgrößen von SF₆ im Zweiphasengebiet bei den Versuchstemperaturen

Tabelle I

| Versuchstemperatur ϑ (°C) | Gasdruck p (bar) | Sättigungsgasdichte ρ_G (g/dm ³) | Flüssigkeitsdichte ρ_{FL} (g/dm ³) | Dichteverhältnis ρ_{FL}/ρ_G |
|-------------------------------------|--------------------|---|---|-------------------------------------|
| -22 | 6,4 | 55 | 1699 | 30,9 |
| -33 | 4,3 | 37 | 1761 | 47,6 |
| -44 | 2,95 | 25 | 1819 | 72,8 |

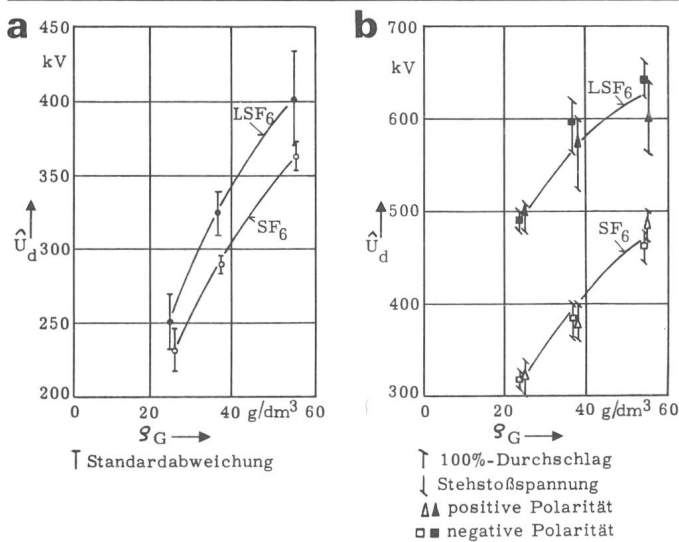


Fig. 1 Durchschlagspannung \hat{U}_d des gasförmigen SF₆(LSF₆) sowie des flüssigen SF₆(LSF₆) in Abhängigkeit von der Gasdichte ρ_G bei Wechselspannungs- (a) bzw. Stoßspannungsbelastung (b)

(Fig. 1a) und bei Blitzstoßspannung um 32 bis 53 % (Fig. 1b) höhere Durchschlagwerte als für SF₆. Während die Standardabweichung bei gasförmigem SF₆ stets kleiner als 5 % ist, erreicht sie bei LSF₆ bis zu 10 %. Die in [11] näher beschriebenen dielektrischen Untersuchungen bei 50-Hz-Wechselspannung haben für LSF₆ eine um etwa den Faktor 1,71 bis 1,76 grössere Dielektrizitätszahl als für SF₆ ergeben.

3.2 Durchschlagverhalten des Zweiphasendielektrikums aus SF₆ und LSF₆

Mit der für diese Untersuchungen verwendeten Messanordnung (konstanter Elektrodenabstand, unterschiedliche Höhe des LSF₆-Pegels) wurde den Verhältnissen Rechnung getragen, wie sie in einer SF₆-Anlage auftreten können, wenn sich kondensiertes SF₆ an niveaumässig am niedrigsten gelegenen Anlagenteilen sammelt. Eine zunehmende Kondensation durch Temperaturabsenkung und damit eine abnehmende Gasdichte

ergibt bei konstanter Höhe des LSF₆-Pegels eine Verminderung der Durchschlagwechsel- (Fig. 2) und Durchschlag-Stoßspannung (Fig. 3). Für Stoßspannung gilt diese Aussage bei LSF₆-Beschichtung sowohl der Anode als auch der Kathode. Unabhängig davon bewirkt eine Zunahme der Höhe des LSF₆-Pegels eine kontinuierliche Verminderung der Festigkeit der Gesamtanordnung (Fig. 2 und 3).

Da die Feldstärke in der Flüssigkeit aufgrund der unterschiedlichen Dielektrizitätszahlen stets kleiner als im Gasspalt ist, ergibt sich bei unipolarer Spannung ein von der Polarität abhängiges Verhalten: Ist die Kathode mit LSF₆ beschichtet (Fig. 3, Kurven I), so wird unabhängig von der Höhe des LSF₆-Pegels eine höhere Durchschlag-Stoßspannung erreicht, als wenn eine LSF₆-Schicht entsprechender Höhe auf der Anode vorhanden ist (Kurven II). Eine Approximierung auf sehr dünne LSF₆-Schichten ($s \rightarrow 0$) ergibt bei beschichteter Anode den nahezu polaritätsunabhängigen Wert des gasförmigen SF₆ ($s = 0$ mm), während die so angenäherte Durchschlagspannung mit dünner LSF₆-Schicht auf der Kathode stets wesentlich höher ist als im unbeschichteten Fall. Grundsätzlich treten die höchsten Durchschlag-Stoßspannungen dann auf, wenn die gesamte Anordnung mit LSF₆ gefüllt ist ($s = 10$ mm). Verdampft in einem solchen Fall jedoch soviel SF₆, dass ein Gasspalt zwischen Elektrode und Flüssigkeit entsteht, so sinkt die Festigkeit der Gesamtanordnung sprunghaft ab.

Die erwähnte Zunahme der Durchschlag-Stoßspannung durch eine LSF₆-Schicht auf der Kathode ist bei den höchsten Gasdichten am stärksten ausgeprägt. Dies hat zur Folge, dass bei 55 g/dm³ die elektrische Festigkeit des Zweiphasendielektrikums im gesamten Schichtdickenbereich grösser als die des rein gasförmigen SF₆ ist (Fig. 3a, Kurve I); bei der Gasdichte von 25 g/dm³ werden dagegen oberhalb eines LSF₆-Pegels von 4 mm geringere Festigkeiten als im Gas ermittelt (Fig. 3b, Kurve I).

4. Physikalische Deutung der Ergebnisse

Der Durchschlag in einem geschichteten SF₆-Dielektrikum kann dann eingeleitet werden, wenn lokal in einem der Dielektrika eine kritische Elektronenlawine entsteht. Für die

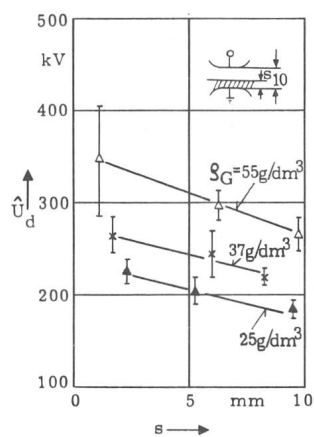


Fig. 2 Durchschlagwechselspannung \hat{U}_d des Schichtdielektrikums aus SF₆ und LSF₆ in Abhängigkeit von der Höhe s des LSF₆-Pegels mit der Gasdichte ρ_G als Parameter

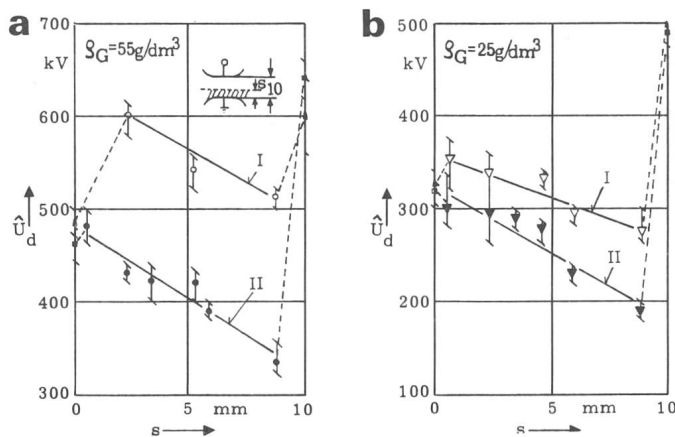


Fig. 3 Durchschlag-Stoßspannung \hat{U}_d des SF₆ ($s = 0$), des LSF₆ ($s = 10$ mm) sowie des Schichtdielektrikums aus SF₆ und LSF₆ in Abhängigkeit von der Höhe s des LSF₆-Pegels bei unterschiedlichen Gasdichten ρ_G

- I Kathode beschichtet (d. h. positive Polarität der Stoßspannung)
- II Anode beschichtet (d. h. negative Polarität der Stoßspannung)

Ermittlung des Ortes, an dem die Festigkeitsgrenze überschritten wird, muss einerseits die elektrische Festigkeit der Einzelkomponenten und andererseits die tatsächlich in den Einzeldielektrika herrschende Feldstärke bekannt sein. Bei dem hier untersuchten SF₆ ist die elektrische Festigkeit des verflüssigten Gases bei 50-Hz-Wechselspannung um 5 bis 10% (Fig. 1a) und bei Blitzstoßspannung um 32 bis 53% (Fig. 1b) höher als die der gasförmigen Komponente; da darüber hinaus die Normalkomponenten der Feldstärken an der Grenzfläche beider Dielektrika umgekehrt proportional zu ihren Dielektrizitätszahlen sind – die Feldstärke ist im Gas also stets höher als in der Flüssigkeit –, kann davon ausgegangen werden, dass das elektrische Verhalten des Zweiphasensystems im wesentlichen von der Festigkeit der gasförmigen Komponente bestimmt wird.

4.1 Einfluss unterschiedlicher LSF₆-Höhen auf die Festigkeit des Gasraumes

Unter Berücksichtigung der genannten Überlegungen lässt sich mit Gleichung (1) die für den verbleibenden Gasspalt gültige Durchschlagfeldstärke E_{dG} aus den gemessenen Durchschlag-Stoßspannungen U_d der Gesamtanordnung (Fig. 3) wie folgt berechnen:

$$\hat{E}_{dG} = \frac{\hat{U}_d}{d - s \left(\frac{\epsilon_{rLSF_6} - \epsilon_{rSF_6}}{\epsilon_{rLSF_6}} \right)} \quad (1)$$

mit d Elektrodenabstand = 10 mm
 s Höhe des LSF₆-Pegels < 10 mm
 ϵ_{rLSF_6} Dielektrizitätszahl des flüssigen SF₆
 ϵ_{rSF_6} Dielektrizitätszahl des gasförmigen SF₆

Für die quantitative Auswertung wird eine Dielektrizitätszahl des SF₆ von 1 und des LSF₆ im Temperaturbereich von –20 bis –40 °C von 1,71 bis 1,76 zugrunde gelegt [11]. Der für LSF₆ angegebene Wert stellt bei Belastung mit Stoßspannungen eine Näherung dar, da die Dielektrizitätszahl lediglich bei 50 Hz gemessen wurde und dementsprechend eine mögliche frequenzabhängige Änderung nicht berücksichtigt ist. Dieser Fehler ist aber vermutlich sehr klein, da in der Literatur für den Frequenzbereich von 10 kHz bis 500 kHz bei –50 °C eine nahezu konstante Dielektrizitätszahl des LSF₆ von $1,81 \pm 0,02$ angegeben wird [12].

Mit diesen Werten lassen sich unter Vernachlässigung mikroskopischer Inhomogenitäten aus den gemessenen Durchschlagspannungen unter Verwendung von Gleichung (1) die Durchschlagfeldstärken im Gasspalt bei unterschiedlicher Höhe des LSF₆-Pegels berechnen und, nachdem sie auf die Gasdichte bezogen worden sind, direkt miteinander vergleichen. Um dabei polaritätsabhängige Unterschiede aufgrund der durch die Flüssigkeitsschicht entstehenden unsymmetrischen Anordnung aufzuzeigen, sollen zunächst die Ergebnisse der Stoßspannungsuntersuchungen diskutiert werden; grundsätzlich sind, abhängig von der jeweiligen Polarität der beschichteten Elektrode, die folgenden Mechanismen zu unterscheiden:

A. Ist die Anode mit LSF₆ bedeckt, d.h., dass sich die Kathode im Gasraum befindet, so wird die Feldstärke an der Anode herabgesetzt und im Kathodenbereich verstärkt. Die quantitative Berechnung der im Gasraum tatsächlich herrschenden Durchschlagfeldstärken ergibt eine von der Höhe des LSF₆-Pegels unabhängige Durchschlagfeldstärke, die mit der

Festigkeit des rein gasförmigen SF₆ ($s = 0$ mm) übereinstimmt (Fig. 4a). Sie ist jedoch geringer als die theoretische, auf die Gasdichte bezogene Grenzfeldstärke $(\hat{E}/\rho)_0$ [11].

Hieraus ist zu schliessen, dass der Durchschlag an lokal begrenzten Feldinhomogenitäten vor der Kathode eingeleitet wird und dementsprechend die Existenz und Lage der Grenzschicht LSF₆/SF₆ keinen Einfluss auf die Festigkeit des Gasraumes ausübt. Mit zunehmender Gasdichte wirken sich die Feldüberhöhungen an den Mikrospitzen stärker aus [9; 10], so dass es zu der beobachteten dichteabhängigen Absenkung der bezogenen Durchschlagfeldstärke des Gasraumes kommt.

B. Ist die Kathode mit LSF₆ bedeckt, d.h., dass sich die Anode im Gasraum befindet, so wird die Feldstärke an der Kathode herabgesetzt und im Anodenbereich verstärkt. Die quantitative Berechnung der im Gasraum tatsächlich herrschenden Durchschlagfeldstärken ergibt eine Zunahme der Festigkeit der Gasstrecke mit abnehmender Breite des Gasspaltes bis auf Werte, die z. T. höher als die theoretische Grenzfeldstärke liegen (Fig. 4b). Im Vergleich zur beschichteten Anode sind die Absolutwerte der Durchschlagfeldstärke im Gasraum grundsätzlich grösser.

Diese höhere Festigkeit des Gasraumes vor der Anode (Fall B, Fig. 4b) im Vergleich zu einer Gasstrecke vor der Kathode (Fall A, Fig. 4a) ist auf die wesentlich ungünstigeren Bedingungen für eine Lawinenbildung vor einer positiven Elektrode zurückzuführen [13]. Da insbesondere auch die notwendige Bereitstellung von Anfangselektronen im Nahbereich der Anode erschwert ist, ergibt sich ein statistischer Volumeneffekt, der die beobachtete Zunahme der Festigkeit der Gasstrecke mit sinkender Breite des Gasspaltes verursacht.

4.2 Einfluss unterschiedlicher LSF₆-Höhen auf die Festigkeit der Gesamtanordnung

Neben den bisher diskutierten Durchschlagfeldstärken im Gasraum des Schichtdielektrikums ist aus anwendungstechnischer Sicht aber vor allem die Änderung der Festigkeit der Gesamtanordnung beim Übergang vom rein gasförmigen SF₆ zum Zweiphasensystem mit dünner LSF₆-Schicht von Inter-

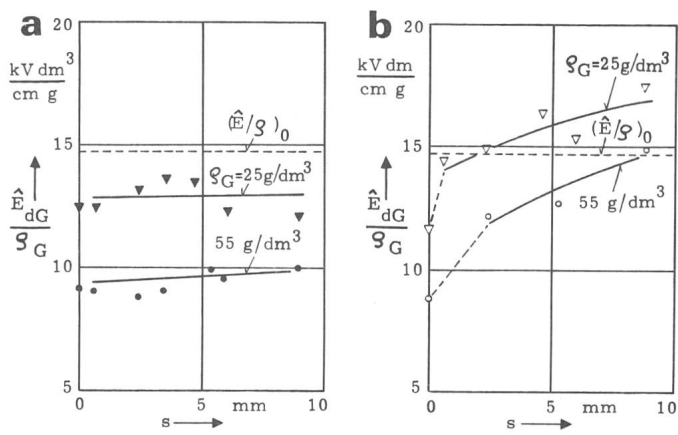


Fig. 4 Auf die Gasdichte bezogene Stoßdurchschlagfeldstärke \hat{E}_{dG}/ρ_G im Gasspalt des Schichtdielektrikums in Abhängigkeit von der Höhe s des LSF₆-Pegels mit der Gasdichte ρ_G als Parameter Berechnet nach Gleichung (1) aus den in Fig. 3 dargestellten 50%-Durchschlag-Stoßspannungen
a Anode mit LSF₆ bedeckt (Kathode im Gasraum)
b Kathode mit LSF₆ bedeckt (Anode im Gasraum)
 $(\hat{E}/\rho)_0$ = theoretische Grenzfeldstärke des SF₆ = 14,8 (kV dm³)/(cm g)

esse. Dabei haben sich entsprechend Fig. 3 wiederum polaritätsabhängige Unterschiede ergeben:

A. Bildet sich eine dünne LSF₆-Schicht auf der Anode, so ändert sich im Vergleich zur reinen Gasisolierung ($s = 0$ mm) die Durchschlagfeldstärke der *Gesamtanordnung* zunächst nicht. Als Ursache hierfür ist anzusehen, dass die Feldverhältnisse vor der sich in jedem Fall im gasförmigen Dielektrikum befindlichen Kathode durch eine dünne Anodenbeschichtung nicht nennenswert beeinflusst werden.

B. Bildet sich eine dünne LSF₆-Schicht auf der Kathode, so nimmt die Festigkeit der *Gesamtanordnung* im Vergleich zur rein gasförmigen Isolierung ($s = 0$ mm) sprunghaft zu. Dieses zunächst überraschende Verhalten ist offensichtlich auf eine Abschwächung der Feldüberhöhung vor Mikrospitzen auf der Kathode durch die dort vorhandene LSF₆-Schicht mit ihrer hohen Dielektrizitätszahl zurückzuführen.

Eine weitere sprunghafte Änderung der elektrischen Festigkeit der Gesamtanordnung wurde beim Übergang vom rein flüssigen SF₆ ($s = 10$ mm) zum Zweiphasendielektrikum mit dünnem Gasspalt vor einer Elektrode gemessen (Fig. 3). In diesem Fall hat sich grundsätzlich eine, je nach Polarität unterschiedlich stark ausgeprägte Verminderung der Durchschlagfeldstärke der Gesamtanordnung ergeben; dieses Resultat ist auf die durch den Dielektrizitätszahlsprung hervorgerufene Feldüberhöhung im Gasraum und die im Vergleich zum LSF₆ geringere Stoßspannungsfestigkeit des SF₆ zurückzuführen.

Bei einer Belastung mit Wechselspannung sind die Platten Elektroden alternierend Kathode bzw. Anode, so dass der Durchschlag immer bei der ungünstigeren Polarität, d.h. an der im Gasraum befindlichen Kathode, eingeleitet wird. Dementsprechend ist ein direkter Vergleich der Wechselspannungsergebnisse mit den Stoßspannungsergebnissen nur für den Fall der beschichteten Anode sinnvoll (Fall A bzw. Fig. 3, Kurven II), bei dem der Stossdurchschlag auch in Kathodennähe eingeleitet wird. Dabei zeigt sich, dass, unter jeweils gleichen Versuchsbedingungen, die Absolutwerte bei Stoßspannung (Fig. 3) um ca. 30% höher als die entsprechenden Wechselspannungswerte (Fig. 2) liegen. Dasselbe Verhältnis war auch bei Untersuchungen des rein gasförmigen SF₆ gefunden worden, während sich beim LSF₆ grössere Unterschiede ergeben hatten (Fig. 1a, b). Hierdurch wird noch einmal bestätigt, dass für die elektrische Festigkeit des Schichtdielektrikums die Vorgänge in der Gasstrecke entscheidend sind.

5. Zusammenfassung

Die Messungen bei Temperaturen von -22 bis -44 °C zeigen, dass das senkrecht zur Feldrichtung geschichtete Dielektrikum aus SF₆ und LSF₆, ähnlich wie das rein gasförmige SF₆, bei hoher Gasdichte elektrisch am stärksten belastbar ist. Bei konstanter Temperatur und damit gleichbleibender Gasdichte nimmt die Durchschlagspannung einer vorgegebenen Anordnung mit steigender Höhe des LSF₆-Pegels kontinuierlich ab. Die Höhe der Absolutwerte wird dabei von der Polarität der mit LSF₆ bedeckten Elektrode bestimmt. Bei der physikalischen Deutung wird der Durchschlag im Zweiphasendielektrikum auf Vorgänge im verbleibenden Gasspalt zurückgeführt; dabei können die polaritätsbedingten Unterschiede dadurch erklärt werden, dass in einer Gasstrecke vor der Kathode günstigere Voraussetzungen für die Lawinenbildung vorliegen als in einem Gasraum vor der Anode.

Literatur

- [1] P. Brückner: SF₆-isolierte Leitersysteme für Hochleistungsübertragung. ETZ-A 92(1971)12, S. 733...737.
- [2] M. Beyer: Neuere Entwicklungen bei elektrischen Isolierstoffen. VDE-Fachberichte 30(1978), S. 65...75.
- [3] B. Gharahbeiglu: Das Durchschlagverhalten des flüssigen Schwefelhexafluorids (SF₆). Dissertation der Technischen Universität Berlin, 1975.
- [4] Y. V. Torshin: Electrical strength of sulfur hexafluoride at high pressure and at the liquid state. Third international conference on gas discharges, 9...12 September 1974. IEE Conference Publications (1974)118, p. 389...393.
- [5] Y. V. Torshin and O. A. Senkevich: Electrical conduction and breakdown in liquid sulfur hexafluoride under condition of below and above critical pressure. Third International Symposium on High Voltage Engineering, Milan, September 1979; paper 23-11.
- [6] H. Bläsig: Über das Durchschlagverhalten von kondensiertem SF₆ im Temperaturbereich von -20 °C bis -40 °C bei unterschiedlichen relativen Feuchten. ETG-Fachtagung (1977)2, Dauerhalten von Isolierstoffen und Isoliersystemen, S. 96...100.
- [7] F. Bachofen and H. Bläsig: The influence of nitrogen on the breakdown voltage of liquid SF₆. Third International Symposium on High Voltage Engineering, Milan, September 1979; paper 23-07.
- [8] H. Bläsig and R. Thaler: Breakdown of SF₆ with drops of liquid SF₆. Third International Symposium on High Voltage Engineering, Milan, September 1979; paper 32-05.
- [9] A. Pedersen: The effect of surface roughness on breakdown in SF₆. IEEE Trans. PAS 94(1975)5, p. 1749...1754.
- [10] W. Zaengl und R. Baumgartner: Zur Ursache der Abweichungen vom Paschen-Gesetz in SF₆. ETZ-A 96(1975)11, S. 510...514.
- [11] H. Bläsig: Das Durchschlagverhalten des gasförmigen und flüssigen SF₆ sowie des Zweiphasendielektrikums bei tiefen Temperaturen. Dissertation der Universität Hannover, 1979.
- [12] D. Berg: Dielectric constant of liquid sulfur hexafluoride. Journal of Chemical Physics 31(1959)2, S. 572...573.
- [13] W. Boeck: Isolationsprobleme in SF₆-isolierten metallgekapselten Anlagen. Bull. SEV/VSE 66(1975)22, S. 1234...1241.

Adresse der Autoren

Prof. Dr.-Ing. Manfred Beyer, Direktor des Schering-Institutes für Hochspannungstechnik und Hochspannungsanlagen der Universität Hannover, Callinstrasse 25, D-3000 Hannover 1, und Dr.-Ing. Helmut Bläsig, RWE Biblis, früherer Mitarbeiter am Schering-Institut.