

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 72 (1981)

**Heft:** 21

**Artikel:** Durchschlagverhalten des Schichtdielektrikums aus gasförmigem und flüssigem SF<sub>6</sub>

**Autor:** Beyer, M. / Bläsig, H.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-905165>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 19.03.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Durchschlagverhalten des Schichtdielektrikums aus gasförmigem und flüssigem SF<sub>6</sub>

Von M. Beyer und H. Bläsig

621.317.333.6;

*Der Beitrag behandelt Untersuchungen zum Einfluss von kondensiertem SF<sub>6</sub> auf die Durchschlagfestigkeit einer SF<sub>6</sub>-Gasstrecke im quasi-homogenen elektrischen Feld.*

*Cet exposé traite des recherches sur l'influence du SF<sub>6</sub> condensé sur la rigidité diélectrique d'une épaisseur de gaz de SF<sub>6</sub> 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 (SF<sub>6</sub>) bei tiefen Temperaturen schon bei geringen Gasdichten erreicht wird.

Durch eine bei Temperaturabsenkung einsetzende Kondensation von SF<sub>6</sub> nimmt in einem geschlossenen System die ursprünglich konstante Gasdichte und damit verbunden die elektrische Festigkeit des SF<sub>6</sub> kontinuierlich ab, und es bildet sich ein Zweiphasendielektrikum aus flüssigem SF<sub>6</sub> (LSF<sub>6</sub>) und gesättigtem SF<sub>6</sub>-Dampf [1; 2]. Infolge der im Vergleich zum gasförmigen SF<sub>6</sub> höheren Dielektrizitätszahl des LSF<sub>6</sub> führt die Kondensation zusätzlich zu einer Veränderung der ursprünglichen Feldverteilung.

Während zum elektrischen und dielektrischen Verhalten der Einzelkomponenten LSF<sub>6</sub> und SF<sub>6</sub> 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 SF<sub>6</sub>-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 LSF<sub>6</sub>-Höhen durchgeführt.

## 2. Messeinrichtungen und Versuchsdurchführung

Die Untersuchungen der verschiedenen SF<sub>6</sub>-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 SF<sub>6</sub> sowie einem senkrecht zur Feldrichtung geschichteten Dielektrikum aus SF<sub>6</sub> und LSF<sub>6</sub> bei unterschiedlicher Höhe des LSF<sub>6</sub>-Pegels durchgeführt.

Für vergleichbare Bedingungen bezüglich der zu untersuchenden SF<sub>6</sub>-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 LSF<sub>6</sub>-Höhen durch zusätzliches Auffüllen mit trockenem SF<sub>6</sub> 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 SF<sub>6</sub>

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 LSF<sub>6</sub> ähnlich wie die des gasförmigen SF<sub>6</sub> 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 LSF<sub>6</sub> bei 50-Hz-Wechselspannung um 5 bis 10%

*Thermodynamische Zustandsgrößen von SF<sub>6</sub> im Zweiphasengebiet bei den Versuchstemperaturen*

Tabelle I

Versuchstemperatur $\vartheta$ (°C)	Gasdruck $p$ (bar)	Sättigungsgasdichte $\rho_G$ (g/dm <sup>3</sup> )	Flüssigkeitsdichte $\rho_{FL}$ (g/dm <sup>3</sup> )	Dichteverhältnis $\rho_{FL}/\rho_G$
-22	6,4	55	1699	30,9
-33	4,3	37	1761	47,6
-44	2,95	25	1819	72,8

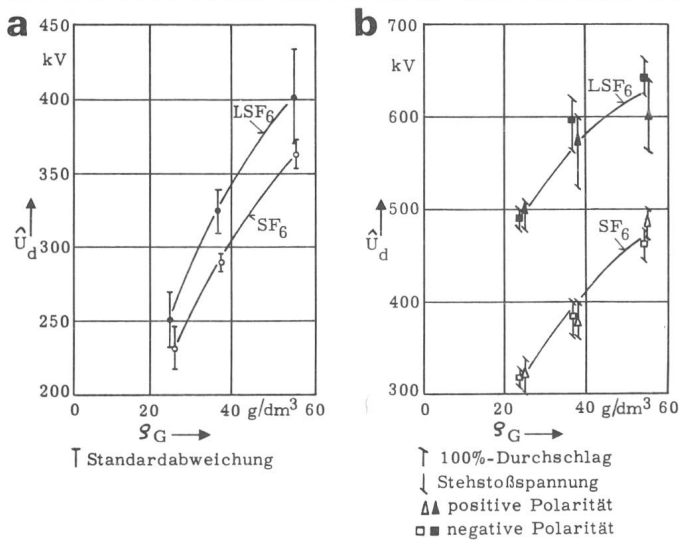


Fig. 1 Durchschlagspannung  $\hat{U}_d$  des gasförmigen SF<sub>6</sub>(LSF<sub>6</sub>) sowie des flüssigen SF<sub>6</sub>(LSF<sub>6</sub>) in Abhängigkeit von der Gasdichte  $\rho_G$  bei Wechselspannungs- (a) bzw. Stoßspannungsbelastung (b)

(Fig. 1a) und bei Blitzstoßspannung um 32 bis 53 % (Fig. 1b) höhere Durchschlagwerte als für SF<sub>6</sub>. Während die Standardabweichung bei gasförmigem SF<sub>6</sub> stets kleiner als 5 % ist, erreicht sie bei LSF<sub>6</sub> bis zu 10 %. Die in [11] näher beschriebenen dielektrischen Untersuchungen bei 50-Hz-Wechselspannung haben für LSF<sub>6</sub> eine um etwa den Faktor 1,71 bis 1,76 grössere Dielektrizitätszahl als für SF<sub>6</sub> ergeben.

### 3.2 Durchschlagverhalten des Zweiphasendielektrikums aus SF<sub>6</sub> und LSF<sub>6</sub>

Mit der für diese Untersuchungen verwendeten Messanordnung (konstanter Elektrodenabstand, unterschiedliche Höhe des LSF<sub>6</sub>-Pegels) wurde den Verhältnissen Rechnung getragen, wie sie in einer SF<sub>6</sub>-Anlage auftreten können, wenn sich kondensiertes SF<sub>6</sub> an niveaumässig am niedrigsten gelegenen Anlagenteilen sammelt. Eine zunehmende Kondensation durch Temperaturabsenkung und damit eine abnehmende Gasdichte

ergibt bei konstanter Höhe des LSF<sub>6</sub>-Pegels eine Verminderung der Durchschlagwechsel- (Fig. 2) und Durchschlag-Stoßspannung (Fig. 3). Für Stoßspannung gilt diese Aussage bei LSF<sub>6</sub>-Beschichtung sowohl der Anode als auch der Kathode. Unabhängig davon bewirkt eine Zunahme der Höhe des LSF<sub>6</sub>-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 LSF<sub>6</sub> beschichtet (Fig. 3, Kurven I), so wird unabhängig von der Höhe des LSF<sub>6</sub>-Pegels eine höhere Durchschlag-Stoßspannung erreicht, als wenn eine LSF<sub>6</sub>-Schicht entsprechender Höhe auf der Anode vorhanden ist (Kurven II). Eine Approximierung auf sehr dünne LSF<sub>6</sub>-Schichten ( $s \rightarrow 0$ ) ergibt bei beschichteter Anode den nahezu polaritätsunabhängigen Wert des gasförmigen SF<sub>6</sub> ( $s = 0$  mm), während die so angenäherte Durchschlagspannung mit dünner LSF<sub>6</sub>-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 LSF<sub>6</sub> gefüllt ist ( $s = 10$  mm). Verdampft in einem solchen Fall jedoch soviel SF<sub>6</sub>, dass ein Gasspalt zwischen Elektrode und Flüssigkeit entsteht, so sinkt die Festigkeit der Gesamtanordnung sprunghaft ab.

Die erwähnte Zunahme der Durchschlag-Stoßspannung durch eine LSF<sub>6</sub>-Schicht auf der Kathode ist bei den höchsten Gasdichten am stärksten ausgeprägt. Dies hat zur Folge, dass bei 55 g/dm<sup>3</sup> die elektrische Festigkeit des Zweiphasendielektrikums im gesamten Schichtdickenbereich grösser als die des rein gasförmigen SF<sub>6</sub> ist (Fig. 3a, Kurve I); bei der Gasdichte von 25 g/dm<sup>3</sup> werden dagegen oberhalb eines LSF<sub>6</sub>-Pegels von 4 mm geringere Festigkeiten als im Gas ermittelt (Fig. 3b, Kurve I).

### 4. Physikalische Deutung der Ergebnisse

Der Durchschlag in einem geschichteten SF<sub>6</sub>-Dielektrikum kann dann eingeleitet werden, wenn lokal in einem der Dielektrika eine kritische Elektronenlawine entsteht. Für die

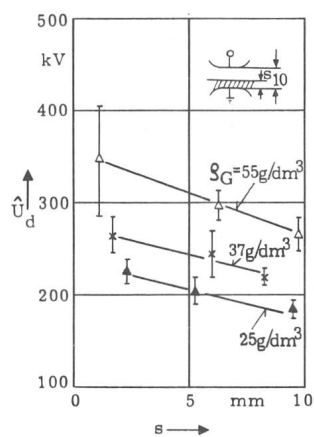


Fig. 2 Durchschlagwechselspannung  $\hat{U}_d$  des Schichtdielektrikums aus SF<sub>6</sub> und LSF<sub>6</sub> in Abhängigkeit von der Höhe  $s$  des LSF<sub>6</sub>-Pegels mit der Gasdichte  $\rho_G$  als Parameter

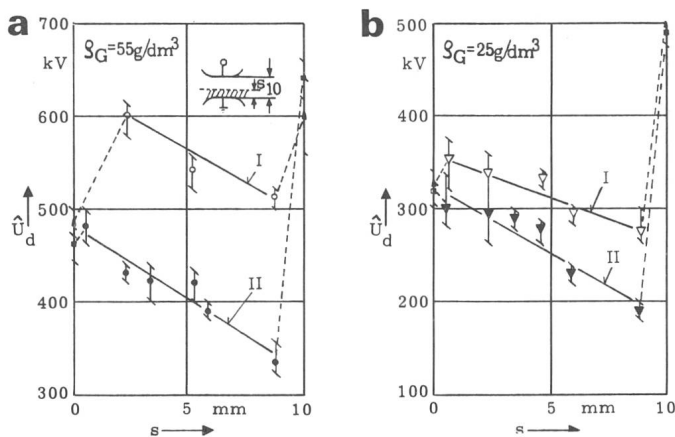


Fig. 3 Durchschlag-Stoßspannung  $\hat{U}_d$  des SF<sub>6</sub> ( $s = 0$ ), des LSF<sub>6</sub> ( $s = 10$  mm) sowie des Schichtdielektrikums aus SF<sub>6</sub> und LSF<sub>6</sub> in Abhängigkeit von der Höhe  $s$  des LSF<sub>6</sub>-Pegels bei unterschiedlichen Gasdichten  $\rho_G$

- 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 SF<sub>6</sub> 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 LSF<sub>6</sub>-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 LSF<sub>6</sub>-Pegels < 10 mm  
 $\epsilon_{rLSF_6}$  Dielektrizitätszahl des flüssigen SF<sub>6</sub>  
 $\epsilon_{rSF_6}$  Dielektrizitätszahl des gasförmigen SF<sub>6</sub>

Für die quantitative Auswertung wird eine Dielektrizitätszahl des SF<sub>6</sub> von 1 und des LSF<sub>6</sub> im Temperaturbereich von –20 bis –40 °C von 1,71 bis 1,76 zugrunde gelegt [11]. Der für LSF<sub>6</sub> 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 LSF<sub>6</sub> 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 LSF<sub>6</sub>-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 LSF<sub>6</sub> 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 LSF<sub>6</sub>-Pegels unabhängige Durchschlagfeldstärke, die mit der

Festigkeit des rein gasförmigen SF<sub>6</sub> ( $s = 0$  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 LSF<sub>6</sub>/SF<sub>6</sub> 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 LSF<sub>6</sub> 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 LSF<sub>6</sub>-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 SF<sub>6</sub> zum Zweiphasensystem mit dünner LSF<sub>6</sub>-Schicht von Inter-

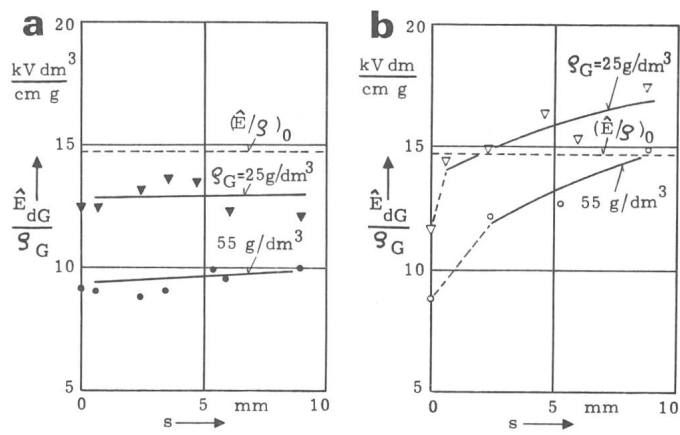


Fig. 4 Auf die Gasdichte bezogene Stoßdurchschlagfeldstärke  $\hat{E}_{dG}/\rho_G$  im Gasspalt des Schichtdielektrikums in Abhängigkeit von der Höhe  $s$  des LSF<sub>6</sub>-Pegels mit der Gasdichte  $\rho_G$  als Parameter Berechnet nach Gleichung (1) aus den in Fig. 3 dargestellten 50%-Durchschlag-Stoßspannungen  
a Anode mit LSF<sub>6</sub> bedeckt (Kathode im Gasraum)  
b Kathode mit LSF<sub>6</sub> bedeckt (Anode im Gasraum)  
 $(\hat{E}/\rho)_0$  = theoretische Grenzfeldstärke des SF<sub>6</sub> = 14,8 (kV dm<sup>3</sup>)/(cm g)

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

A. Bildet sich eine dünne LSF<sub>6</sub>-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 LSF<sub>6</sub>-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 LSF<sub>6</sub>-Schicht mit ihrer hohen Dielektrizitätszahl zurückzuführen.

Eine weitere sprunghafte Änderung der elektrischen Festigkeit der Gesamtanordnung wurde beim Übergang vom rein flüssigen SF<sub>6</sub> ( $s = 10$  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 LSF<sub>6</sub> geringere Stoßspannungsfestigkeit des SF<sub>6</sub> 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 SF<sub>6</sub> gefunden worden, während sich beim LSF<sub>6</sub> 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 SF<sub>6</sub> und LSF<sub>6</sub>, ähnlich wie das rein gasförmige SF<sub>6</sub>, 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 LSF<sub>6</sub>-Pegels kontinuierlich ab. Die Höhe der Absolutwerte wird dabei von der Polarität der mit LSF<sub>6</sub> 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: SF<sub>6</sub>-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 (SF<sub>6</sub>). 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 SF<sub>6</sub> 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 SF<sub>6</sub>. Third International Symposium on High Voltage Engineering, Milan, September 1979; paper 23-07.
- [8] H. Bläsig and R. Thaler: Breakdown of SF<sub>6</sub> with drops of liquid SF<sub>6</sub>. Third International Symposium on High Voltage Engineering, Milan, September 1979; paper 32-05.
- [9] A. Pedersen: The effect of surface roughness on breakdown in SF<sub>6</sub>. IEEE Trans. PAS 94(1975)5, p. 1749...1754.
- [10] W. Zaengl und R. Baumgartner: Zur Ursache der Abweichungen vom Paschen-Gesetz in SF<sub>6</sub>. ETZ-A 96(1975)11, S. 510...514.
- [11] H. Bläsig: Das Durchschlagverhalten des gasförmigen und flüssigen SF<sub>6</sub> 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 SF<sub>6</sub>-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.