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: 68 (1977)

Heft: 12

Artikel: Beeinflussung der dielektrischen Festigkeit von SF6-Isolationen durch funktionsbedingte Störstellen auf den Elektroden

Autor: Bachofen, F. / Zaengl, W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915038

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

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

Beeinflussung der dielektrischen Festigkeit von SF_6-Isolationen durch funktionsbedingte Störstellen auf den Elektroden

Von F. Bachofen und W. Zaengl

621.315.618.9:621.3.015.2

Der Einfluss von makroskopischen Störstellen wie Nuten, Stufen oder Bohrungen auf den Elektroden von SF_6-Isolationen auf die Spannungsfestigkeit wird rechnerisch unter Berücksichtigung der Streamer-Theorie untersucht. Die experimentelle Überprüfung führt zu einer guten Übereinstimmung zwischen den Messwerten und den berechneten Abhängigkeiten. Auf Grund der Resultate können Dimensionierungsrichtlinien für derartige Störstellen angegeben werden.

Des endroits perturbateurs macroscopiques sur les électrodes, tels que rainures, gradins ou perçages exercent une influence sur la rigidité diélectrique d'isolations en SF_6, qui est examinée numériquement en tenant compte de la théorie des streamers. La vérification expérimentale montre une bonne concordance entre les valeurs mesurées et les interdépendances calculées. Les résultats permettent de donner des directives pour le dimensionnement de ces endroits perturbateurs.

1. Einleitung

Schwefelhexafluorid (SF_6) hat im letzten Jahrzehnt als Isoliermittel in der Hochspannungstechnik verbreitete Anwendung gefunden. Als Beispiele seien erwähnt: SF_6-isolierte physikalische Apparate, SF_6-gekapselte Schaltanlagen und SF_6-Schalter. Bei Schwaigerschen Ausnutzungsfaktoren von ca. 45 % und mehr [1][1]) können bei den meisten Anwendungen von SF_6-Isolationen die elektrostatischen Felder als quasihomogen angesehen werden. Bei solchen Verhältnissen erfolgt ein Durchschlag unmittelbar ohne vorherige Vorentladungen. Aus der Durchschlagstheorie ergibt sich, dass bei den für solche Isolationen angewendeten Drücken von 2 bar und mehr und den minimalen Krümmungsradien der Elektroden von wenigen cm, die Durchschlagsfeldstärke den Wert von ca. $88{,}5 \cdot p$ kV/cm (p in bar) haben sollte. In der Praxis stellte man wohl eine bei gegebenem Gasdruck ungefähr konstante Durchschlagsfeldstärke fest, doch weicht diese wesentlich vom theoretischen Wert ab. Für Blitzstoßspannungen erhält man noch etwa 60...80 % des theoretischen Wertes. Diese Abweichungen können bekanntlich auf den Einfluss von Partikeln im Gasraum oder auf die Wirkung einer fertigungsbedingten Elektrodenrauheit zurückgeführt werden [2; 3].

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

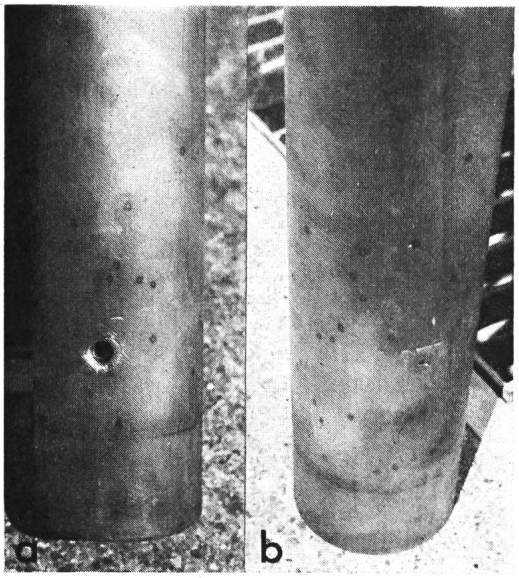

Fig. 1 Leiter einer SF_6-isolierten Schaltanlage mit typischer funktionsbedingter Störstelle und Überschlagspuren
a Vorderseite b Rückseite

Da die Abhängigkeit des effektiv wirksamen Ionisationskoeffizienten von Feldstärke und Gasdruck (Gasdichte) für SF_6 sehr gut bekannt ist und nur mehr wenig Zweifel an der Anwendbarkeit der Streamer-Theorie für die Berechnung kritischer Elektronenlawinen bestehen, lässt sich der Teilentladungs-Einsatz oder die Durchschlagsspannung einer SF_6-isolierten Elektrodenanordnung mittels Feldberechnung, bei der die Streamer-Theorie berücksichtigt wird, recht genau vorausbestimmen. Mit Feldberechnungsprogrammen für Elektronenrechner können auch Felder komplizierter Geometrien genau berechnet werden, sofern sie rotationssymmetrisch oder eben sind. Die Vielfalt möglicher Feldkonfigurationen erfordert jedoch die Untersuchung spezieller Fälle.

So kommt es häufig vor, dass aus funktionellen Gründen Störstellen an sonst grossflächigen Elektroden bei SF_6-Anlagen nicht zu vermeiden sind, wie beispielsweise durch Bohrungen für den Gasdurchtritt oder zum Ansetzen von Werkzeugen, oder Spalte und Stufen an Stellen, wo zwei Elektrodenteile zusammenstossen usw. Die Erfahrung zeigt, dass oftmals solche Störstellen die Durchschlagsfestigkeit nicht beeinflussen, obschon man mit erheblichen lokalen Feldstärkeerhöhungen an den Störstellen rechnen muss. Als Beispiel sei aufgeführt, dass bei über vierzig Überschlägen an einer konzentrischen Zylinderanordnung mit einem quer in den Innenleiter gebohrten Loch von 10 mm Durchmesser mit abgerundetem Rand keine Anhäufung der Durchschlagsspuren in der Nähe dieses Loches festgestellt werden konnte (Fig. 1). Es scheint also, dass einerseits Mikrorauheiten, welche man sich üblicherweise als einzelne, über die Elektrodenoberfläche vorstehende Spitzchen vorstellt, schon bei wenigen µm Höhe eine wesentliche Reduktion der Durchschlagsspannung verursachen können, während Störstellen anderer Geometrie mit Abmessungen von mehreren mm keine weitere Reduktion der Durchschlagsspannung bewirken. Für den Konstrukteur ist es wichtig zu wissen, wie gross solche unvermeidbaren Störstellen sein dürfen, ohne dass mit einer Verminderung der Durchschlagsfestigkeit zu rechnen ist. Daher wurde der Einfluss definierter Störstellen rechnerisch und experimentell ermittelt.

2. Rechenverfahren

Es wird eine homogene Funkenstrecke angenommen, deren eine Elektrode mit der Störstelle behaftet ist, während sich die andere Elektrode in unendlich weiter Entfernung befindet. In Fig. 2 ist ein typischer qualitativer Verlauf der Feldstärke E längs einer Feldlinie in der Nähe der Störstelle dargestellt. E_∞ ist hierbei der Feldstärkewert des ungestörten Feldverlaufes. Aus der Streamertheorie ergibt sich dann als Bedingung für

den Teilentladungs-Einsatz oder Durchschlag in SF_6 in Anlehnung an [3]

$$\int_0^{s_1} [E(s) - E_{kr}]\, ds \geqq K/k;\; E_{kr} = p(E/p)_0; \tag{1}$$

wobei als Zahlenwerte $(E/p)_0 = 88{,}5$ kV/cm · bar und K/k = 0,47 kV angenommen werden können. Die schraffierte Fläche in Fig. 2 muss somit $\geqq K/k$ sein, um eine Entladung zu zünden; die bei dieser Zündung auftretende Spannung berechnet sich aus einer Integration der Feldstärke E_∞ über den gesamten Elektrodenabstand (unter Vernachlässigung der Feldstörung), und die relative Verschlechterung der Isolierfähigkeit der Gasstrecke bei zunehmendem Gasdruck ergibt sich aus der linearen Vergrösserung von E_{kr} mit dem Gasdruck p, die wegen der notwendigen Anpassung des $E(s)$-Maßstabes nicht zu einer proportionalen Zunahme von E_∞ führt.

Bei einer analytischen Feldberechnung wird der Feldstärkeverlauf $E(s)$ zweckmässigerweise normiert angegeben; weiterhin ist der Potentialverlauf $V(s)$ bekannt. Ist d eine typische Abmessung der Störstelle, so können folgende bezogene Grössen eingeführt werden:

$$\varrho = \varrho(s) = \frac{E_\infty}{E(s)};\; \Phi = \Phi(s) = \frac{V(s)}{d \cdot E_\infty}$$

ϱ ist somit ein bezogener Reziprokwert des Feldstärkeverlaufes und Φ ein bezogener Potentialverlauf. Mit diesen Grössen lässt sich Gl. (1) in die folgende Form umwandeln:

$$p \cdot d \cdot \left(\frac{E}{p}\right)_0 \left[\varrho(\Phi_1)(\Phi_1 - \Phi_0) - \int_{\Phi_0}^{\Phi_1} \varrho \cdot d\Phi\right] \geqq \frac{K}{k} \tag{2}$$

Hierbei ist $\Phi_1 > \Phi_0$ und

$$\varrho(\Phi_1) = E_\infty / E_{kr} = R \tag{3}$$

der Reduktionsfaktor, d.h. das Verhältnis zwischen der makroskopischen Durchschlagfeldstärke des Homogenfeldes und der theoretisch möglichen Durchschlagfeldstärke des ungestörten Feldes bei grossem Abstand.

Löst man Gl. (2) nach $(p \cdot d)$ auf, so wird schliesslich:

$$pd \geqq \frac{K}{k \cdot (E/p)_0} \left[R(\Phi_1 - \Phi_0) - \int_{\Phi_0}^{\Phi_1} \varrho \cdot d\Phi\right]^{-1} \tag{4}$$

Die Grössen ϱ und Φ sind miteinander durch eine Feldliniengleichung verknüpft. Durch Variation von Φ_1 lässt sich für diese Feldlinie mit den Gleichungen (3) und (4) eine Beziehung zwischen R und pd darstellen. Diese Berechnung kann für verschiedene Feldlinien durchgeführt werden, so dass sich

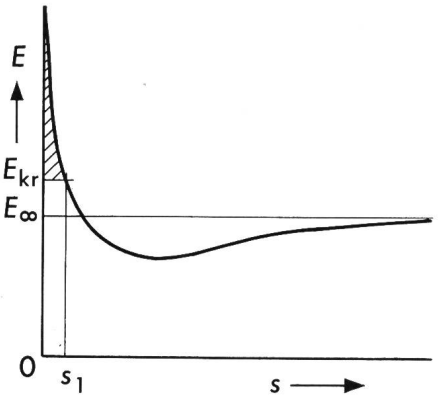

Fig. 2 Feldstärkeverlauf längs einer Feldlinie in der Nähe der Störstelle

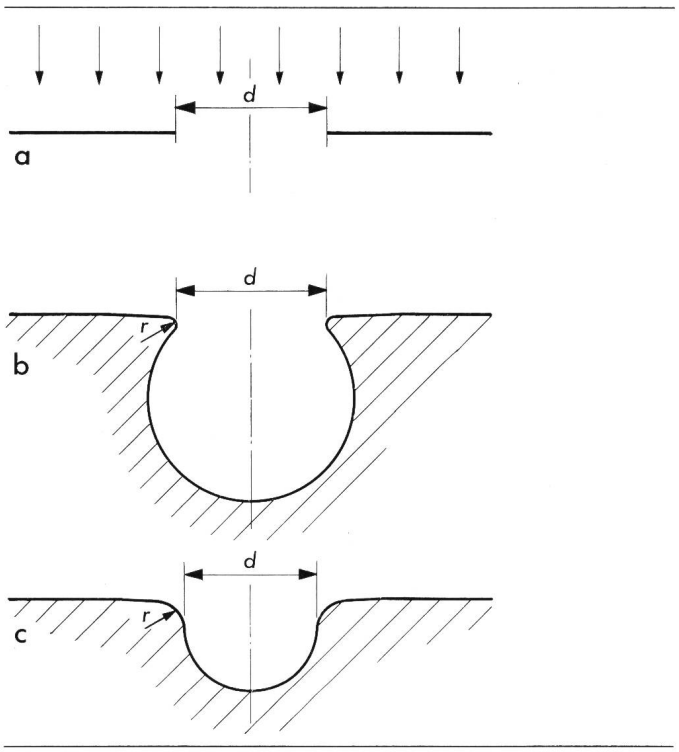

Fig. 3 a Profil der Schlitzblende ($\Phi_0 = 0$)
b Aus dem Feldbild der Schlitzblende entnommenes Profil einer Nut mit gerundeten Rändern ($\Phi_0 = 0{,}05$; $r/d \approx 0{,}02$)
c Wie b, jedoch mit stärkerer Abrundung ($\Phi_0 = 0{,}1$; $r/d \approx 0{,}1$)
d Schlitzbreite

eine Schar von Kurven $R(pd)$ ergibt. Die Hüllkurve dieser Kurvenschar ergibt dann die Funktion $R(pd)$ für die gesamte Störstelle.

Φ_0 ist das bezogene Potential an der Elektrodenoberfläche. Durch Variationen von Φ_0 können irgendwelche Äquipotentialflächen eines Feldbildes als Elektrodenflächen angenommen werden. Ist z.B. durch $\Phi_0 = 0$ eine scharfkantige Störstelle definiert, so kann durch geeignete Wahl eines Wertes $\Phi_0 > 0$ der Einfluss einer ähnlichen Störstelle, jedoch mit gerundeten Kanten, berechnet werden.

3. Gerechnete Beispiele

Das beschriebene Rechenverfahren wurde auf drei Typen von Störstellen angewendet, nämlich Schlitzblende, Stufe und Lochblende. Die Felder dieser drei Geometrien sind analytisch berechenbar, die Schlitzblende und die Stufe mit der Methode der konformen Abbildung [4; 5], die Lochblende mittels einer geeigneten Koordinatentransformation [5]. Durch die Wahl von verschiedenen Φ_0-Werten lässt sich auch der Einfluss von Nuten und Bohrungen mit abgerundeten Rändern sowie von abgerundeten Stufen berechnen. In Fig. 3...5 sind die entsprechenden, aus den Feldbildern entnommenen Profile dargestellt.

Die mit einem programmierbaren Tischrechner Wang 720 C berechneten Reduktionsfaktoren R sind in Fig. 6...8 in Funktion von pd für die drei Störstellentypen mit den abgerundeten Varianten graphisch dargestellt. Die Kurven zeigen den für Homogenfelder mit Störstelle typischen Verlauf. Für kleine pd-Werte kann das Durchschlagskriterium Gl. (1) nur erfüllt werden, wenn $E_{kr} < E_\infty$; die Störstelle hat also keinen Einfluss auf die Durchschlagsfestigkeit, und somit ist der Re-

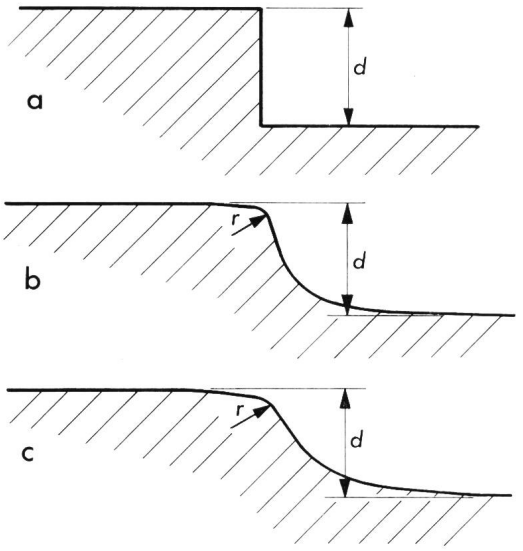

Fig. 4 **a Profil der scharfkantigen Stufe** ($\Phi_0 = 0$)
b Aus dem Feldbild der scharfkantigen Stufe entnommenes Profil einer abgerundeten Stufe ($\Phi_0 = 0{,}1$; $r/d \approx 0{,}1$)
c Wie b, jedoch mit stärkerer Abrundung ($\Phi_0 = 0{,}2$; $r/d \approx 0{,}2$)
d Stufenhöhe

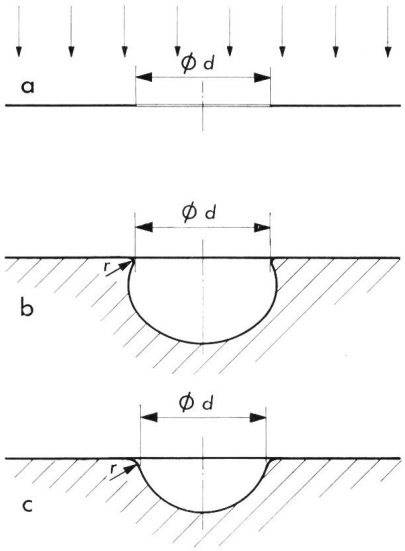

Fig. 5 **a Profil der Lochblende** ($\Phi_0 = 0$)
b Aus dem Feldbild der scharfkantigen Lochblende entnommenes Profil einer Bohrung mit abgerundetem Rand ($\Phi_0 = 0{,}025$; $r/d \approx 0{,}02$)
c Wie b, jedoch mit stärkerer Abrundung ($\Phi_0 = 0{,}05$; $r/d \approx 0{,}1$)
d Lochdurchmesser

duktionsfaktor R gleich 1. Bei grösseren pd-Werten wird R rasch kleiner und erreicht bei extrem grossen pd-Werten einen Endwert, der durch die Feldverstärkung an der Störstelle gegeben ist. Bei den scharfkantigen Störstellen ist der Feldverstärkungsfaktor unendlich und der Endwert des Reduktionsfaktors wird theoretisch null.

Es ist nun bemerkenswert, dass die Knickpunkte, bei denen der Reduktionsfaktor von 1 abzuweichen beginnt, bei viel höheren pd-Werten liegen als die entsprechenden Punkte für vorstehende Spitzen. Bei Spitzen mit der Form eines halben Rotationsellipsoids liegt dieser Knick bei $pd \approx 5 \cdot 10^{-3}$ bar · cm, wenn hier mit d die Höhe der Spitze bezeichnet wird, während er für die scharfkantige Lochblende bei $pd \approx 1{,}5 \cdot 10^{-1}$ bar · cm liegt. Der Grund für dieses Verhalten ist darin zu suchen, dass die hier behandelten Störstellen eigentlich ein Fehlen von Material in der Elektrode bedeuten. Alle der Störstelle zugeordneten Feldlinien sind somit länger als die Feldlinien, welche weit von der Störstelle entfernt sind. Somit muss vor jeder

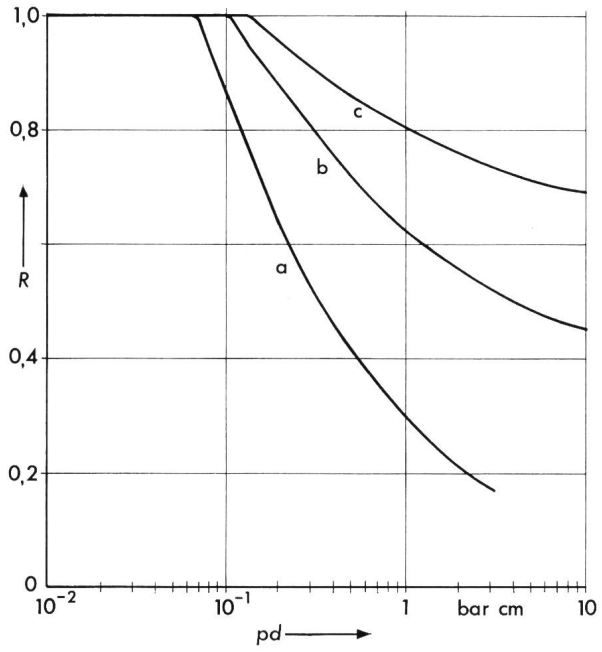

Fig. 6 **Reduktionsfaktoren**
a für Schlitzblende nach Fig. 3a
b für Nut nach Fig. 3b
c für Nut nach Fig. 3c

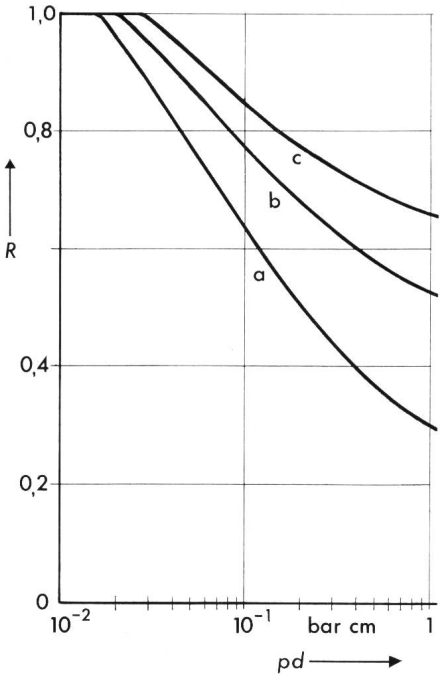

Fig. 7 **Reduktionsfaktoren**
a für scharfkantige Stufe nach Fig. 4a
b für abgerundete Stufe nach Fig. 4b
c für abgerundete Stufe nach Fig. 4c

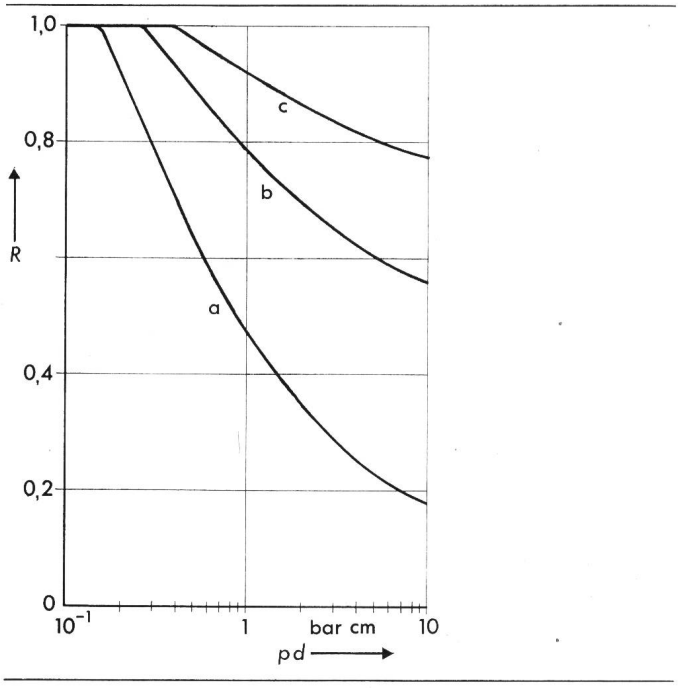

Fig. 8 Reduktionsfaktoren
a für Lochblende nach Fig. 5a
b für abgerundete Bohrung nach Fig. 5b
c für abgerundete Bohrung nach Fig. 5c

Störstelle eine Zone liegen, in welcher die Feldstärke geringer ist als die Homogenfeldstärke. Der Feldstärkeabfall vor der Störstelle muss deshalb steiler sein als bei einer vorstehenden Störstelle, welche immer eine Verkürzung der Feldlinien bewirkt.

4. Experimentelle Überprüfung [2])

Die gerechneten Beispiele zeigen, dass diese Feld-Anordnungen entweder grundsätzlich nicht exakt (Schlitzblende, Stufe) oder nur näherungsweise (Lochblende) experimentell nachbildbar sind, da sowohl Felder einer konformen Abbildung vorliegen, die senkrecht zur Darstellungsebene unendlich ausgedehnt sind, als auch Elektrodengeometrien gewählt werden müssten, die nicht mit genügender Genauigkeit hergestellt werden können (z.B. beliebig scharfe Kanten). Beim Entwurf der Elektroden wurde daher lediglich darauf geachtet, dass eine praxisnahe Anordnung entsteht, die die berechneten Feldverhältnisse näherungsweise simuliert und keinen zu grossen Aufwand an Elektroden und Prüfgefässen erfordert.

Hochspannungserzeugung: Alle Versuche wurden mit Wechselspannung, 50 Hz, durchgeführt. Als Spannungsquelle dienten 2 in Kaskade geschaltete 100-kV-Transformatoren (5 kVA, rel. Kurzschlußspannung ca. 7 %). Trotz der auch durch den vorgeschalteten Stelltransformator begrenzten Kurzschlussleistung wurden zur weiteren Begrenzung des Kurzschlussstromes noch eine Schnellabschaltung im Primärkreis der Prüfkaskade (Abschaltzeit max. 40 ms) und ein vor dem Prüfobjekt liegender 500-kΩ-Dämpfungswiderstand verwendet, um bei Durchschlägen die Entstehung zusätzlicher Störquellen zu vermeiden.

[2]) Die experimentelle Untersuchung erfolgte im Laboratorium für Hochspannungstechnik an der ETHZ mittels einer finanziellen Unterstützung durch die Sprecher + Schuh AG, Aarau. Die Messungen wurden von Herrn dipl. El. Ing. *Dieter Braun* durchgeführt.

Hochspannungsmessung: Die notwendige Scheitelwertmessung der Wechselspannung erfolgte hochspannungsseitig mit Hilfe des bekannten Verfahrens nach Chubb-Fortescue (Gleichrichtung des Ladestromes eines an der zu messenden Spannung liegenden Kondensators), wobei der Messkondensator von ca. 50 pF direkt an der Prüfkaskade, also vor dem 500-kΩ-Widerstand lag, um auch die im Messkondensator gespeicherte Energie weitgehend in diesem Widerstand zu vernichten. Die Genauigkeit dieser Scheitelwertmessung liegt bei $\leq 2\,\%$.

Teilentladungsmessung: Die mit Hilfe der Streamer-Theorie berechneten Zündfeldstärken führen – abhängig vom örtlichen Feldstärkeverlauf und vom Gasdruck – entweder zu einem Teilentladungseinsatz (TE-Einsatz) oder direkt zu einem Durchschlag [1]. Daher musste auch die TE-Einsatzspannung bestimmt werden. Dies erfolgte oszillographisch ohne Verwendung eines üblichen TE-Messgerätes, wobei jedoch durch eine Brückenschaltung und die hohe Oszillographenempfindlichkeit eine einwandfreie Detektierung möglich war.

Prüfgefässe: Für die Nachbildung des Feldstärkeverlaufes an den berechneten Störstellen eignen sich Anordnungen, die entweder von einem homogenen Plattenfeld oder einem koaxialen Zylinderfeld abgeleitet werden. Um die Eigenkapazität der Prüfgefässe möglichst klein zu halten, wurden grundsätzlich Isoliermantel-Gefässe gewählt. Die plattenförmigen Elektroden befanden sich in einem zylindrischen Plexiglas-Gefäss von 120 mm Innendurchmesser und ca. 1100 mm Länge, wobei die Gasversorgung vom erdseitigen Metallflansch aus erfolgte und die Abstandseinstellung am hochspannungsseitigen Metallflansch bei gefülltem Druckgefäss vorgenommen werden konnte. Für die zylinderförmigen Elektroden wurde ein Gefäss verwendet, welches im Prinzip aus zwei Plexiglas-Gefässen dieser Art zusammengesetzt war (Fig. 9). Beide Gefässe konnten sowohl im Unterdruck- als auch Überdruckbereich bis 6 bar verwendet werden.

Elektrodensysteme: Alle Elektroden wurden aus Messing angefertigt. Die mit der konformen Abbildung berechneten Profile wurden in einem koaxialen Zylinderfeld nachgebildet, obschon dadurch auch ohne Störstelle kein homogenes Bezugsfeld (E_∞ in Fig. 2) erzielbar ist. Wählt man nicht zu ungünstige Radienverhältnisse, so wird die Inhomogenität dieses Grundfeldes nicht zu gross. Bei der benützten Anordnung (Fig. 10a) beträgt der Schwaigersche Ausnutzungsfaktor ca. 85 %, wobei die auf dem Innenzylinder angebrachte Störstelle nicht berücksichtigt ist.

Das Feldbild der Schlitzblende, bzw. die daraus abgeleitete Nut, wurde durch eine parallel zur Zylinderachse eingefräste Nut quadratischen Querschnitts nachgebildet (Fig. 10b), die länger als der Aussenzylinder war. Sie wurde scharfkantig gefräst ($r = 0$; Schlitzblende) oder mit Schmirgeltuch abgerundet (Sollwert $r = 0{,}5$ mm; $r/d = 0{,}1$).

Die Feldbilder der Stufen nach Fig. 4 wurden durch eine Abstufung des Innenzylinder-Radius vorgenommen (Fig. 10c), wobei die Stufenhöhe d möglichst klein im Verhältnis zur Schlagweite (hier 9 mm) sein muss. Mit dem gewählten Wert von $d = 2$ mm wird diese Forderung genügend gut erfüllt, wie andere Versuche zeigten. Neben der durch r bestimmten Krümmung entsteht hier noch eine durch das Zylinderfeld hervorgerufene, zusätzliche Krümmung. Da diese aber bei den vor-

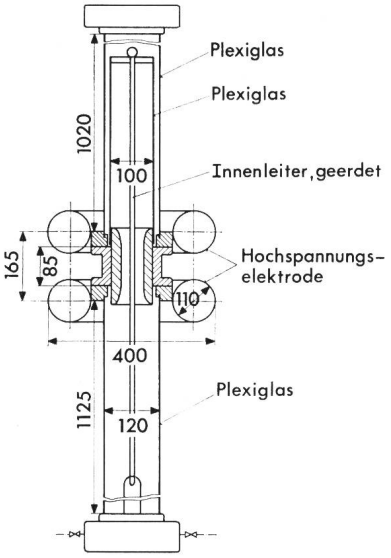

Fig. 9 Prüfgefäss für koaxiale Zylinderanordnungen nach Fig. 10

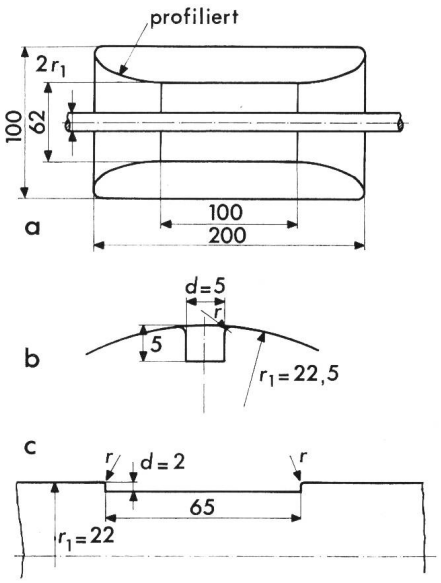

Fig. 10 Koaxiales Elektrodensystem
a Hauptabmessungen
b Teilquerschnitt Innenzylinder für die Nachbildung der Schlitzblende und Nut nach Fig. 3
c Teillängsschnitt Innenzylinder für die Nachbildung der Stufe nach Fig. 4

liegenden Abmessungen vergleichsweise klein ist, kann sie vernachlässigt werden.

Bei den mittels Koordinatentransformation berechneten Feldern einer Lochblende nach Fig. 5 liegen dreidimensionale Felder vor, die in ein Homogenfeld übergehen. Zur Nachbildung eignet sich daher ein planparalleles Plattenpaar, in dessen einer Platte die Störstelle vorgesehen wird. Grundsätzlich könnte zwar auch die ideale Lochblende simuliert werden, sofern eine extrem dünne, gelochte Metallfolie zwischen zwei planparallele Elektroden gebracht wird. Da eine derartige Anordnung jedoch technisch bedeutungslos ist, wurde dieser Fall durch ein scharfkantig gebohrtes Loch angenähert (Fig. 11). Auch die aus dem Feld der Lochblende abgeleiteten Vertiefungen (Fig. 5b und 5c) wurden lediglich durch eine Bohrung geeigneter Tiefe und entsprechender Abrundung der Ränder hergestellt.

Versuchsdurchführung: Die Elektroden wurden vor dem Einbau mit Trichloräthylen gereinigt und mit Pressluft abgeblasen. Nach einer erstmaligen Evakuierung wurde das Prüfgefäss mit SF_6 von 1 bar gefüllt, nochmals evakuiert und dann bis zum Betriebsdruck geflutet. Als SF_6 wurde handelsübliche Qualität, gemäss CEI-Publ. 376, verwendet.

Ein Messpunkt ist das Ergebnis von mindestens 10 Einzelmessungen, wobei die ersten 2 bis 5 Messwerte nicht gewertet wurden. Die Spannungssteigerung erfolgte bis zu ca. 80% des Erwartungswertes schnell und anschliessend langsam mit ca. 0,5 kV/s. Die relative Standardabweichung aller Messwerte war – mit wenigen Ausnahmen – kleiner als 2% und wird daher nicht weiter angegeben. Die Gastemperaturen lagen zwischen 19,5 und 22 °C.

Versuchsergebnisse: Um die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen direkt mit den Berechnungen vergleichen zu können, wurden die Messwerte in der Form $R = f(pd)$ in den Figuren 12 bis 14 aufgetragen (vgl. dazu Fig. 6...8). Da Spannungen gemessen werden, wird der Reduktionsfaktor R aus Umrechnungen ermittelt: Aus der gemessenen Spannung wurde der Messwert der Feldstärke jeweils aus der makroskopischen, ungestörten Feldgeometrie bestimmt, beim koaxialen Zylinder also aus dem Maximalwert der Feldstärke am Innenzylinder. Die Division dieses Wertes durch $E_{kr} = (E/p)_0 \cdot p$ liefert dann den gesuchten Reduktionsfaktor R. Dabei wurde für $(E/p)_0$ der Wert von 88,5 kV/cm bar angenommen, was nicht exakt richtig ist, da bei den vorliegenden Abständen von etwa 1 cm und kleinen Drücken – der Gasdruckbereich erstreckte sich zwischen ca. 0,1 bis 5 bar – der Reduktionsfaktor etwas grösser als 1 werden kann. Verursacht wird diese Erscheinung durch die bekannte Abhängigkeit der auf den Gasdruck bezogenen Durchschlagfeldstärke vom Produkt Gasdruck mal Abstand (bzw. Radius).

In den Figuren 12...14 sind jene theoretischen Abhängigkeiten gestrichelt eingetragen, die durch die Experimente nachgebildet werden sollten. In Fig. 12 ist dies zunächst der starke Abfall von R bei der theoretischen Schlitzblende ($r/d = 0$,

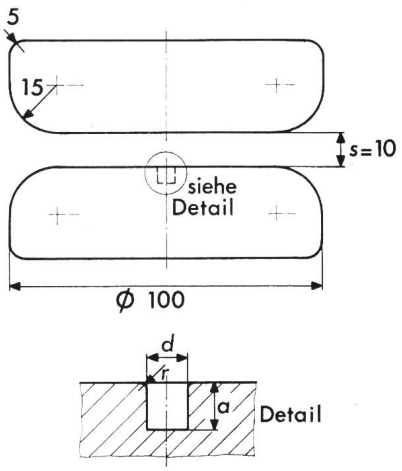

Fig. 11 Plattenelektroden für die Nachbildung der Lochblende und der Bohrung nach Fig. 5

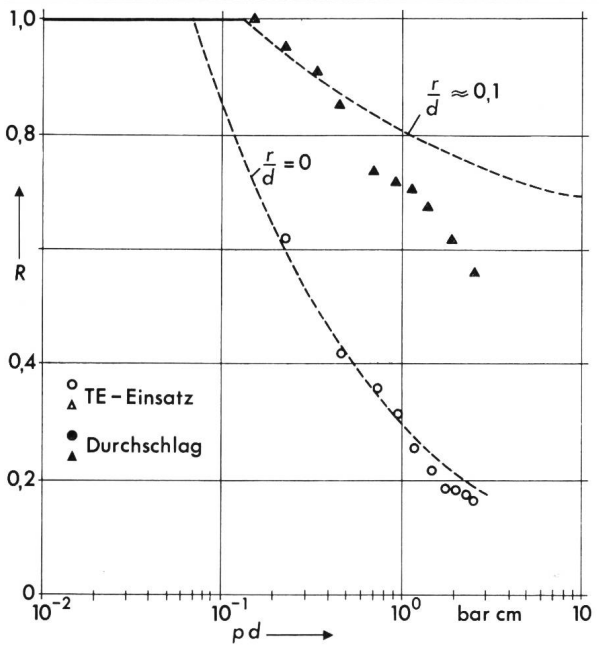

Fig. 12 Reduktionsfaktoren
Messergebnisse; Nut nach Fig. 10b

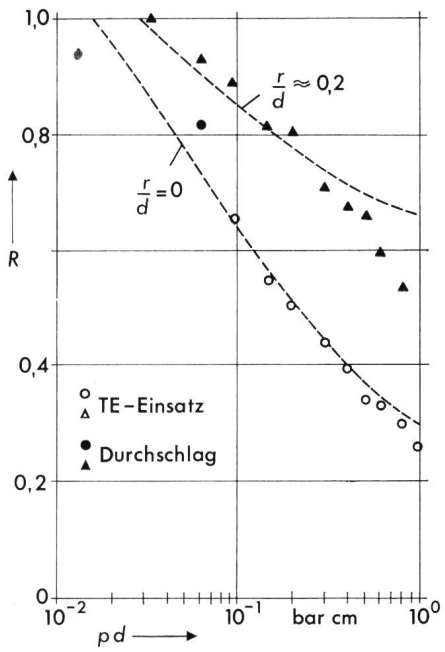

Fig. 13 Reduktionsfaktoren
Messergebnisse; Stufen nach Fig. 10c

vgl. Fig. 3a und 6a), die durch eine scharfkantige Nut angenähert wird. Trotzdem findet man eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment. Die restlichen Messwerte wurden mit einer abgerundeten Nut ermittelt, wobei ein Wert von $r/d = 0{,}1$ bei der Herstellung der Abrundung angestrebt wurde. Eine stichprobenartige Nachkontrolle der Radien mit Hilfe eines hochpräzisen Abtastgerätes[3]) zeigten jedoch, dass die Radien anstelle des Sollwertes von 0,5 mm Werte zwischen etwa 0,3 und 0,55 mm aufwiesen. Dass sich bei derartig unterschiedlichen Feldverhältnissen aber die grossen Krümmungen erst bei höheren Gasdrücken bemerkbar machen können, wie dies aus Fig. 12 ersichtlich ist, wurde in [3] bereits gezeigt. Die stärkeren Abweichungen bei hohen (pd)-Werten könnten aber auch von den Durchschlägen herrühren, die trotz aller Vorsichtsmassnahmen zu neuen Störstellen führen.

Auch bei der Nachbildung der Stufen liegen ähnliche Ergebnisse vor (Fig. 13). Während die scharfkantige Stufe ($r/d = 0$; vgl. Fig. 4a und 7a) sehr gut der theoretischen Abhängigkeit folgt, wird der Reduktionsfaktor bei der abgerundeten Stufe (mittlerer Istwert der Abrundung: $r/d = 0{,}24$) und hohen (pd)-Werten zu klein, wobei dieselben Erscheinungen wie bei Fig. 12 als Ursachen für diese Abweichungen in Frage kommen.

Bei den durch Bohrungen in einer Plattenelektrode simulierten Feldern einer Lochblende (Fig. 14) bestätigt sich die relative Unempfindlichkeit derartiger Störstellen dadurch, dass auch bei scharfkantigen Bohrungen erst ab Werten von $(pd) \gtrsim 0{,}2$ bar · cm mit einer Absenkung der Durchschlagfestigkeit zu rechnen ist. Schon kleine Abrundungen (mittlerer Istwert der Abrundung: $r/d \approx 0{,}1$) erhöhen diesen Wert erheblich. Deutlich bemerkbar macht sich bei diesen Messungen der gegenüber 1 erhöhte Reduktionsfaktor, worauf bereits hingewiesen wurde. Der Gasdruck lag hier bei $\lesssim 0{,}7$ bar, und aus Gl. (1) lässt sich leicht nachrechnen, dass bei 1 cm Schlagweite die wirkliche Bezugsfeldstärke E_{kr} um 1 % und mehr ansteigt.

[3]) Diese Messungen wurden dankenswerterweise vom Institut für Werkzeugmaschinenbau und Fertigungstechnik der ETHZ durchgeführt.

5. Praktische Anwendung

Anhand der vorliegenden Rechen- und Messresultate wurde eine Richtlinie für zulässige Abmessungen solcher Störstellen aufgestellt, nach welcher der Konstrukteur die zulässigen Abmessungen und die notwendigen Abrundungsradien nicht vermeidbarer Störstellen bestimmen kann. Die gleiche Richtlinie erlaubt auch den Qualitätskontrollstellen, über die Zulässigkeit von bei der Herstellung entstandenen Oberflächenfehlern objektiv zu entscheiden.

Die Richtlinie unterscheidet zwischen verschiedenen Beanspruchungen von Elektrodenoberflächen, da bei schwach beanspruchten Oberflächen die zulässigen Abmessungen von Störstellen wesentlich grösser sind. Die zulässigen Abmessun-

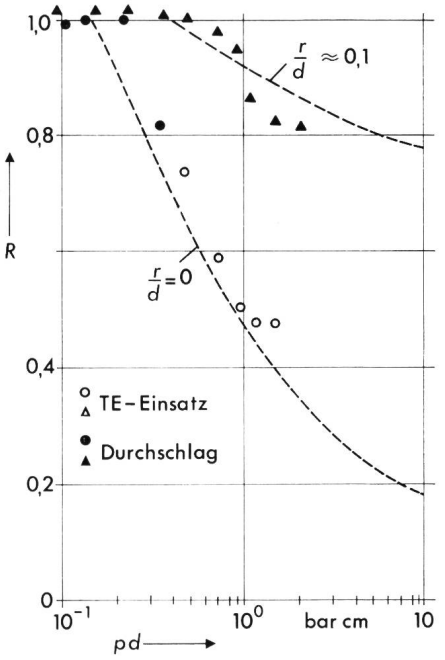

Fig. 14 Reduktionsfaktoren
Messergebnisse; Bohrung nach Fig. 11

Zulässige Breite d von Spalten, Schlitzen und Nuten bei einem Gasdruck von 4,1 bar Tabelle I

		Rechnerisch nach Fig. 6	Praktisch zugelassen
Scharfkantig	Bereich A	0,54 mm	0,5 mm
	Bereich B	2,32 mm	2,0 mm
Abgerundet	$r/d \geqq 0{,}1$		
	Bereich A	$>$ 25 mm	1,0 mm *)
	Bereich B	$>$ 25 mm	10 mm

*) Grössere Werte zulässig, wenn der Krümmungsradius der Elektrode mehr als 10 mm beträgt

gen wurden durchwegs kleiner gewählt, als aus der Rechnung hervorgeht, und zwar aus folgenden Gründen:

– Die Rechnung basiert auf der Annahme ebener Elektroden im Homogenfeld unendlicher Ausdehnung. Bei praktischen SF_6-Isolationen sind die Elektroden jedoch meistens einfach oder doppelt gekrümmt und die Schlagweiten sind auf wenige cm begrenzt. Die berechneten zulässigen Abmessungen von Störstellen dürfen nur dann unbesehen angewendet werden, wenn sie wesentlich geringer als der Elektrodenkrümmungsradius und die Schlagweite sind.

– Wegen des zusätzlichen Einflusses von Mikrorauheiten sind bei Störstellen mit Abrundungen die gemessenen Reduktionsfaktoren oft geringer als die berechneten.

In Tabelle I werden am Beispiel der Schlitzblende die zulässigen Abmessungen nach der Dimensionierungsrichtlinie mit den rechnerisch ermittelten Werten verglichen. Der Bereich A entspricht hoch beanspruchten Elektrodenflächen, für welche ein zulässiger Reduktionsfaktor von 0,6 angenommen wurde, und der Bereich B mittelstark beanspruchten Oberflächen mit einem zulässigen Reduktionsfaktor von 0,3.

6. Schlussfolgerungen

Die durch funktionsbedingte Störstellen auf den Elektroden wie Nuten, Stufen und Bohrungen, hervorgerufene Reduktion der Spannungsfestigkeit von SF_6-Isolationen lässt sich rechnerisch ermitteln. Die theoretisch gefundenen Reduktionsfaktoren stimmen mit den experimentell gefundenen im wesentlichen überein. Abweichungen erklären sich durch zusätzliche, in der Rechnung nicht berücksichtigte Faktoren.

Aufgrund der rechnerisch und experimentell gefundenen Resultate lassen sich Richtlinien für die zulässigen Abmessungen solcher Störstellen aufstellen, bei deren Einhaltung die Störstellen keine Reduktion der Spannungsfestigkeit bewirken, die über das bei technischen Elektroden ohne solche Störstellen infolge des Einflusses der Mikrorauheit ohnehin schon festgestellte Mass hinausgeht.

Literatur

[1] *S. Sangkasaad:* Dielectric strength of compressed SF_6 in nonuniform fields. Dissertation No. 5738 of the Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, 1976.

[2] *A. Pedersen:* The effect of surface roughness on breakdown in SF_6. IEEE Trans. PAS 94(1975)5, p. 1749...1754.

[3] *W. Zaengl* und *R. Baumgartner:* Zur Ursache der Abweichungen vom Paschen-Gesetz in SF_6. ETZ-A 96(1975)11, S. 510...514.

[4] *H. Prinz:* Hochspannungsfelder. München/Wien, R. Oldenbourg Verlag, 1969.

[5] *E. Weber:* Electromagnetic fields. Theory and applications. Vol. I: Mapping of fields. New York, John Wiley and London, Chapmann and Hall, 1950.

Adressen der Autoren

Dipl. El.-Ing. *Felix Bachofen*, Sprecher + Schuh AG, 5036 Oberentfelden und Prof. Dr. *W. Zaengl*, Professor für Hochspannungstechnik, ETHZ, Physikstrasse 3, 8092 Zürich,