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: 76 (1985)

Heft: 13

Artikel: Die Gefährdung der Spannungssicherheit von SF6-isolierten Apparaten durch Fremdteilchen

Autor: Gänger, B.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904639

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: 09.12.2025

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

Die Gefährdung der Spannungssicherheit von SF_6-isolierten Apparaten durch Fremdteilchen

B. Gänger

Die an und für sich sehr hohe elektrische Festigkeit von SF_6-Gas kann in den Hochspannungsapparaten und -anlagen bei weitem nicht voll genutzt werden, weil Oberflächenmängel an den Elektroden und vor allem Unsauberkeiten im Gas und im Kapselungsraum das Isoliervermögen stark erniedrigen können. Anhand der neueren technischen Literatur wird zusammenfassend über die physikalischen Vorgänge beim Vorhandensein frei beweglicher Partikel im starken elektrischen Feld und über die von ihnen bewirkte Reduktion der Festigkeit im Gasraum berichtet.

Während dieser Aufsatz sich mit den Vorgängen im Gas befasst, wird ein späterer Artikel in der Novemberausgabe 76(1985)23 auf die Probleme eingehen, die sich an den festen Isolatoren in SF_6-Apparaten durch Teilchenverschmutzung ergeben, und auch mögliche Gegenmassnahmen zur Verhinderung eines Isolationsversagens behandeln.

La très grande rigidité diélectrique du gaz SF_6 ne peut pas être totalement utilisée dans des appareils et installations à haute tension à cause de défauts à la surface des électrodes et surtout de malpropretés dans le gaz et dans son enceinte de blindage, ce qui réduit considérablement le pouvoir isolant. En se basant sur la récente littérature technique, l'auteur décrit les processus physiques en présence de particules mobiles dans un puissant champ électrique ainsi que la réduction de la rigidité diélectrique qui en résulte dans le gaz.

Tandis que le présent article examine les processus dans le gaz un prochain article dans le Bulletin 76(1985)23 traitera des problèmes que provoque la contamination et l'encrassement par particules des isolateurs solides, de même que les précautions qui pourraient être prises pour éviter le risque d'une défaillance de l'isolement.

Adresse des Autors

Dr. *B. Gänger*, Dufourstrasse 5, 5430 Wettingen.

1. Problemstellung

Die Isolierdistanzen in Hochspannungsapparaten und -anlagen, die mit Schwefelhexafluoridgas (SF_6) unter erhöhtem Druck gefüllt sind, müssen weit reichlicher bemessen werden, als dies nach den Ansätzen zur Ermittlung der elektrischen Festigkeit eigentlich zu erwarten wäre. Dies rührt nicht etwa, wie vielfach vermutet, von einer speziellen Empfindlichkeit des SF_6-Gases auf Verunreinigungen her, sondern ist Ausdruck dafür, dass die sehr hohe elektrische Festigkeit der komprimierten, stark elektronegativen Gase besonders anfällig auf selbst kleinste und engbegrenzte Störungen des elektrischen Feldes ist. Die breit angelegte Forschung der vergangenen zwei Jahrzehnte hat in aller Klarheit zu erkennen gegeben, dass der Grund dafür sowohl im mangelhaften Zustand der einander zugewandten Leiteroberflächen unterschiedlicher Potentiale als auch in unzureichender Sauberkeit der Bauteile und des Füllgases zu suchen ist. Selbst bei grösster Sorgfalt bei der Herstellung und dem Zusammenbau der Geräte bleiben in der Praxis die erreichten spezifischen Festigkeitswerte stets unter denen, wie sie bei extremem Vorgehen im Labor vielleicht noch erreichbar sind und nach entladungstheoretischen Ansätzen auch erreicht werden müssten.

Für das Homogenfeld erhält man diesen Höchstwert in guter Annäherung aus der Gleichsetzung der Anzahl von durch Stossionisation im Feld erzeugten Elektronen mit den gleichzeitig durch Anlagerung verlorengehenden zu 88,4 kV pro Zentimeter Isolierdistanz und pro Bar Gasdruck. Mit den beiden Bestimmungsgrössen Schlagweite und Druck sollte der Höchstwert nahezu verhältnisgleich ansteigen.

Tatsächlich muss jedoch unter den jeweiligen Verhältnissen mit störenden Nebeneffekten und einem erheblich niedrigeren Isoliervermögen gerechnet werden. In Figur 1 sind die von einer grossen Herstellerfirma je nach Betriebsdruck als noch zulässig erachteten Feldstärkewerte am Umfang des Hochspannungsleiters von Hoch- und Höchstspannungsapparaten angeführt [1; 2]. Ihre Einhaltung sollte Gewähr für ein Bestehen der Abschlussprüfungen wie auch für die Sicherstellung eines ungestörten Betriebes über lange Zeit bieten. Generell fallen die Kurven bei einer Erhöhung des Gasdruckes, oder, mit anderen Worten, die Halte- bzw. die Durchschlagspannung nimmt keinesfalls mit dem Druck verhältnisgleich zu, sondern weit weniger. Beim oft angewandten Betriebsdruck von rund 4 bar kann beispielsweise bei Beanspruchung mit Schaltspannung nur noch mit wenig mehr als der Hälfte des theoretischen Höchstwertes gerechnet werden; bei der 1-min-Prüfung mit Wechselspannung liegt der anzusetzende Wert noch etwas tiefer (bei 43%). Entspricht jedoch die Sauberkeit nicht den zu stellenden Anforderungen, so liegen die Höchstgradienten noch tiefer und werden noch erheblich

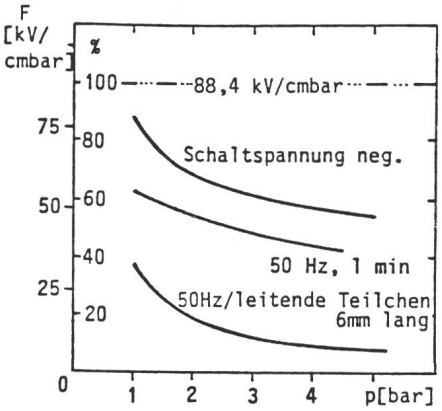

Fig. 1 Bezogene Festigkeitswerte (Scheitelwerte) in SF_6-Apparaten in Funktion des Gasdruckes

F erreichbare Festigkeit
P Gasdruck

weiter heruntergedrückt bei Vorhandensein von Fremdteilchen im Kapselungsraum.

Über die Ursachen der Festigkeitseinbusse bestanden lange Zeit nur recht unklare Vorstellungen. So herrschte kein Einverständnis darüber, ob es sich dabei um Effekte grundsätzlicher Art als Folge des hohen Druckes bei den Elementarprozessen der Elektronenauslösung und Ladungsträgervermehrung oder allein um Nebeneffekte recht grosser Tragweite handelte. Eine grosse Zahl von Untersuchungen des letzten halben Jahrhunderts beschäftigten sich mit dem Gültigkeitsbereich der Paschenregel, nach der bekanntlich die Durchschlagspannung allein vom Produkt Schlagweite mal Gasdruck bestimmt wird und bei gleichbleibender Schlagweite ein nahezu druckproportionaler Anstieg der Festigkeit zu erwarten ist. Die Abweichungen der Durchschlagspannung nach unten fielen jedoch stets um so grösser aus, je mehr das Produkt der beiden Parameter gewisse kritische Werte übertraf. Auch nahm mit dem Druck die Streuung der Messwerte sehr stark zu; die Sorgfalt bei der Reinigung der Versuchsapparatur und des Füllgases spielte dabei eine gewichtige Rolle, und der Erstdurchschlagwert lag fast durchweg deutlich unter den im weiteren erhaltenen Durchschlagwerten; doch konnte sich die Verbesserung nach einer Reihe von Funkenübergängen auch in ihr Gegenteil verkehren. Bei höheren Gasdrükken schien auch nach den meisten Untersuchungen der Werkstoff der Elektroden von einiger Bedeutung zu sein. Stets wurde gefunden, dass mit einer Vergrösserung des an den Vorgängen beteiligten aktiven Volumens bzw. der massgeblichen Elektrodenflächen die elektrische Festigkeit in logarithmischer Abhängigkeit zurückging. Die bei Labormessungen an kleinen Prüfanordnungen erhaltenen Resultate dürfen daher nur unter Berücksichtigung des Geometriefaktors auf technische Anordnungen übertragen werden.

Als entscheidende Einflussgrössen für alle diese Abweichungen von der Paschen-Gesetzmässigkeit wurde schon frühzeitig der Reinheitsgrad des Gases sowie die Beschaffenheit der Elektrodenoberflächen erkannt. Dass diese jedoch die einzigen Einflussgrössen sind und alles davon abhängt, die für einen Durchschlag in Frage kommenden Elektrodenflächen völlig glatt und somit frei von selbst nur geringen Unebenheiten zu halten und ebenso im Gas schwebende und im elektrischen Feld zu den Elektroden hindriftende Fremdpartikel gänzlich zu vermeiden, wurde erst neuerdings klar erkannt. Sind diese Grundforderungen durch weitestgetriebene Sauberkeit beim Zusammenbau der Prüfanordnung und extreme Sorgfalt bei der Versuchsdurchführung erfüllt, so erhält man beim Erhöhen des Gasdruckes im selben Mass ansteigende Festigkeitswerte und hohe Werte gleich beim ersten Versuch. Dieser Nachweis wurde an der ETH Zürich in einer sehr sorgfältigen und tiefschürfenden Dissertationsarbeit erbracht [3] und damit abschliessend allen weiteren Spekulationen über sonstige Verursachungen von Tiefdurchschlägen der Boden entzogen.

Allerdings sind die dazu nötigen ausserordentlichen Massnahmen wie Feinstpolitur der Elektroden, extreme Begrenzung des Durchschlagstromes und der im Funken umgesetzten Energie oder Wechsel der Elektroden nach jedem Funken, Auswaschen der zusammengebauten Anordnung im Reinigungsbad und Ausdampfen der letzten Flüssigkeitsreste im Vakuum [4; 5], Zuführung des Füllgases über Mikroporenfilter usw. in der Praxis des industriellen Fertigungsprozesses nicht realisierbar. Ausserdem hat man es oft mit Geräten zu tun, in denen betriebsmässig Längs- oder Drehbewegungen ihrer Teile und schnelle Strömungen der Gasfüllung stattfinden oder gar Lichtbögen von einiger Dauer oder grosser Intensität mit der Folge von Abrieb an den Gleitstellen und der Verdampfung von Elektrodenmaterial an den Lichtbogenfusspunkten auftreten. Es muss somit mit starken Abweichungen von den idealen Verhältnissen im Gasraum, an den Elektroden und den stützenden Isolatoren gerechnet werden. Als besonders nachteilig gelten gutleitende, leichtbewegliche Teilchen wie metallischer Abrieb, Splitter und dergleichen. Hingegen wird die elektrische Festigkeit durch das Vorhandensein von Teilchen aus nichtleitenden Materialien weit weniger in Mitleidenschaft gezogen.

Im nachfolgenden wird über die auf solche festen Teilchen einwirkenden Kräfte und die daraus im starken elektrischen Feld resultierenden Bewegungen eingegangen. Daran schliesst sich anhand der neueren Publikationen ein Überblick über das Ausmass der zu erwartenden Verschlechterungen des Isoliervermögens an.

2. Ladungen und Kräfte auf ein Teilchen

Isolierende Teilchen werden zwar im elektrischen Feld durch Verschiebungen von Ladungen im Molekularbereich polarisiert, doch bleiben sie als Ganzes ungeladen und sind nicht zu gerichteten Bewegungen im Feld befähigt. Nahe beieinander befindliche Staub- oder Faserteilchen erfahren höchstens auf Zusammenhalt im Haufen wirkende Kräfte. Weil sie die Schlagweite nicht verkürzen und zu den Elektroden nicht hingezogen werden und somit den Durchschlag nicht einleiten können, stellen die nichtleitenden Teilchen für die Isolierung eines SF_6-Apparates keine erhebliche Gefahrenquelle dar.

Liegt ein *leitendes* Teilchen in einem Feld der Stärke E_0 auf einer der Elektroden, so besitzt es die Ladung Q, und es wird zur Gegenelektrode mit der Kraft $K = QE_0$ hingezogen. Befindet sich die Gegenelektrode senkrecht über ihm, so wird es von seiner Unterlage abgehoben, sobald die Feldkraft sein Gewicht übertrifft. Die dazu erforderliche Abhebefeldstärke wird von der Grösse, Form und Lage des Teilchens und seinem spezifischen Gewicht beeinflusst.

In Tabelle I sind unter der Voraussetzung, dass das Teilchen koronafrei bleibt und es also keine Ladung verliert, ferner dass seine Höhe im Vergleich zum Elektrodenabstand nur gering ist, sein Auftrieb im Gas unberücksichtigt bleiben kann und keine Adhäsionskräfte es auf der Unterlage zurückhalten, Formeln zur Berechnung der Ladung Q, der auf das Teilchen einwirkenden Kraft K sowie dem aus der Gleichsetzung von Gewicht und Anziehungskraft sich ergebenden Abhebegradienten E_A im Homogenfeld für einige wichtige Fälle angeführt [6].

Die zum Abheben benötigte Kraft ist um die Bildkraft zwischen Ladung des Teilchens und an der Unterlage gespiegelter Ladung kleiner als die im freien Raum auf das Teilchen einwirkende. Beim Abheben verstärkt sich somit der Zug auf das Teilchen, und es fliegt im Homogenfeld und bei Gleichspannung mit zunehmender Beschleunigung zur Gegenelektrode. Erst recht gilt dies für das Zylinderfeld beim Flug zum Innenleiter, wo ja mit der Entfernung x von der Unterlage die Feldstärke gemäss

Liegende leitende Teilchen im Homogenfeld Tabelle I

Anordnung	Ladung $Q(E_0)$ [C]	Elektrostatische Kraft K [N]	Abhebegradient E_A [V/m]
Dünnes Blatt (Folie) der Fläche F und (sehr kleinen) Höhe h auf Elektrode aufliegend	$\varepsilon_0 F E_0$	$\frac{1}{2} \varepsilon_0 F E_0^2$	$1{,}41 \sqrt{\frac{h \gamma g}{\varepsilon_0}}$
Halbzylinder (Radius R, Länge L) auf Elektrode aufliegend)	$4 \varepsilon_0 R L E_0$	$\frac{8}{3} \pi \varepsilon_0 R L E_0^2$	$0{,}43 \sqrt{\frac{R \gamma g}{\varepsilon_0}}$
Runddraht (Radius R, Länge L) auf Elektrode aufliegend	$2 \pi \varepsilon_0 R L E_0$	$1{,}43 \pi \varepsilon_0 R L E_0^2$	$0{,}84 \sqrt{\frac{R \gamma g}{\varepsilon_0}}$
(Schlankes) Halbellipsoid (Radius R, Länge L) auf Elektrode stehend	$\frac{\pi \varepsilon_0 L^2 E_0}{\ln\left(\frac{2L}{R}\right)-1}$	$\pi \varepsilon_0 \frac{\ln \frac{L}{R} - 0{,}5}{\left(\ln \frac{2L}{R} - 1\right)^2} L^2 E_0^2$	$0{,}82 \left(\ln \frac{2L}{R} - 1\right) \sqrt{\frac{R^2 \gamma g}{\varepsilon_0 L \left(\ln \frac{L}{R} - 0{,}5\right)}}$
Halbkugel (Radius R) auf Elektrode liegend	$3 \pi \varepsilon_0 R^2 E_0$	$9 \pi \varepsilon_0 R^2 E_0^2$	$0{,}27 \sqrt{\frac{R \gamma g}{\varepsilon_0}}$
Vollkugel auf Elektrode liegend[1]	$6{,}57 \pi \varepsilon_0 R^2 E_0^2$	$5{,}47 \pi \varepsilon_0 R^2 E_0^2$	$0{,}49 \sqrt{\frac{R \gamma g}{\varepsilon_0}}$

Q Ladung K elektrostatische Zugkraft E_A zum Abheben von der Unterlage erforderliche Feldstärke (IS-Einheiten)

[1] Die analogen Berechnungsformeln für den Fall des kugeligen Teilchens im koaxialen Zylinderfeld findet man in [7].

$$E(x) = \frac{U}{(R_a - x)\, ln \frac{R_a}{R_i}} \qquad (1)$$

fortlaufend zunimmt.

Längliche Teilchen werden beim Abheben zufolge einer am einen Ende zufallsweise leicht grösseren Zugkraft aus ihrer instabilen Schwebelage sofort ins Feld hineingedreht. In dieser Lage (Längsachse parallel zu den Feldlinien) ist ihre Ladung, sofern sie noch einen letzten Kontakt mit der Unterlage hatten, grösser als beim flachliegenden Teilchen, wie man sich etwa anhand der Formeln von Tabelle I für das aufgestellte Halbellipsoid im Vergleich zum liegenden Drahtstück überzeugen kann. Dementsprechend bleiben solche länglichen Teilchen beim Zurückregeln der Spannung länger aufrecht stehen, bevor sie schliesslich in die Horizontale zurückfallen.

Solange das Teilchen frei von Korona bleibt, ist seine Abhebespannung vom Füllgas und dessen Druck unabhängig. Die von den Berechnungsformeln vorausgesagten Werte fanden sich im Gleichfeld stets gut beschäftigt (Fig. 2) [8]. Mit Wechselspannung wurden vorwiegend etwas höhere Werte gefunden. Nur nach [8] sind die Scheitelwerte gleich gross, gemäss [9] und [10] liegen sie jedoch bei Wechselspannung um etwa 10% bis zu 40% höher. Gehäusevibrationen können die Abhebespannung erniedrigen [11].

3. Die Bewegung der Teilchen

3.1 Gleichspannung

Nach dem Abheben fliegt das Teilchen mit zunehmender Beschleunigung auf kürzestem Weg zur anderen Elektrode, wo es umgeladen wird. Im Zylinderfeld erhöht sich dabei seine Ladung wegen der rund 2,7mal grösseren Feldstärke am Innenleiter gleicherweise. Nach dem unelastischen Stoss (Rückprallkoeffizient bei rund 0,6...0,8) beginnt es den Rückflug mit entsprechend reduzierter Geschwindigkeit. Unter Berücksichtigung der bei höheren Drücken nicht mehr zu vernachlässigenden Reibung im Gas, aber Nichtbeachtung des Energieverlustes beim Aufprall ist in Figur 3 eine gerechnete Weg-Zeit-Kur-

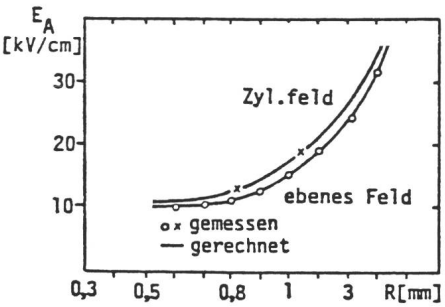

Fig. 2 Berechnete und gemessene Abhebefeldstärke E_A
mit Stahlkügelchen vom Radius R im Gleichfeld [7]

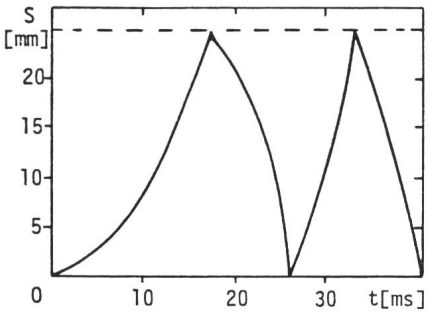

Fig. 3 Weg-Zeit-Diagramm eines Al-Kügelchens von 3 mm Durchmesser im Homogenfeld
(Plattenabstand 28 mm, E_0 = 30 kV/cm, p = 1 bar)

ve der Hin- und Herbewegung eines Aluminiumkügelchens im Homogenfeld, gültig für ein Mehrfaches der Abhebefeldstärke, wiedergegeben [7]. Es werden Geschwindigkeiten bis zu einigen m/s erreicht; die Zeit für einen Übergang stabilisiert sich nach wenigen Durchgängen, bei Pendelfrequenzen von einigen 10 Hz. Bei technischen Anordnungen werden sich etwas längere Flugzeiten ergeben.

Im stärkeren elektrischen Feld können sich Entladungen am Teilchen ausbilden, und zwar wird vorzugsweise beim Auftreffen am Innenleiter im Zylinderfeld die Feldstärke an seinem dem Kapselungsrohr zugewandten Ende so sehr ansteigen, dass dort Korona einsetzt oder es gar zum Durchschlag der ganzen Isolierdistanz kommt. Oder das Feld zwischen dem sich nähernden Teilchen von entgegengesetzter Ladung und der Elektrode wird so verstärkt, dass bereits kurz vor der Berührung eine energieschwache Entladung den Spalt überbrückt. Der Nachweis für das tatsächliche Auftreten solcher Mikrodurchschläge wurde mittels Zeitdehnerfilmaufnahmen und anhand von Oszillogrammen des Entladungsstromes oder der emittierten schwachen Lichtblitze erbracht [8; 12]. Aus solchen Beobachtungen liess sich auch die Beziehung zwischen Entladungslänge und Randfeldstärke E_0 am Innenleiter herleiten [12]. Die Übereinstimmung mit den unter Zugrundelegung der Paschenkurve errechneten grösstmöglichen Schlagweiten ist sehr gut (Fig. 4), wobei nur als Folge der Durchschlagverzögerung je nach den Umständen beim Vorkommen eines Erstelektrons die Schlagweite im allgemeinen um einiges kürzer ist. In Luft von Atmosphärendruck braucht es zur Zündung der Mikroentladung eine Mindeststärke des äusseren Feldes von etwa 1,1 kV/cm (Fig. 4). Mit der Feldstärke erhöht sich die Schlagweite von kleinen Bruchteilen eines Zehntelmillimeters bis gegen 1 Millimeter.

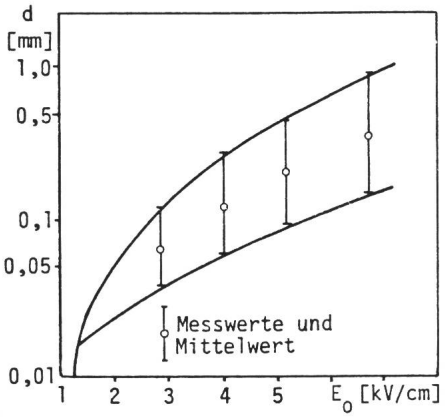

Fig. 4 Schlagweiten *d* der Mikroentladung in Luft in Abhängigkeit von der Stärke E_0 des äusseren Feldes [12]

obere Grenzkurve: errechnet nach Paschen
untere Grenzkurve: erhalten aus maximaler Streuung der Funkenbildung

Die Koronaausbildung am abgewandten Ende des gerade am Innenleiter eingetroffenen Teilchens kann auch dazu Anlass geben, allerdings nur im Gleichfeld und vorzugsweise bei negativer Polarität des Innenleiters, dass eine unruhig zuckende Leuchterscheinung nahe beim Leiter zu beobachten ist (Glühwürmchen-Effekt) [10; 13]. Eine mögliche Erklärung ist die, dass das Teilchen nach dem Rückstoss in die von ihm verursachte und langsam zum Leiter driftende Ionenwolke hineingerät und dabei seine Ladung verliert oder sogar positiv aufgeladen wird, dann erneut vom Innenleiter angezogen wird und beim Kontakt wiederum auf dessen Polarität umgeladen wird usw. Falls aber das Teilchen am Leiter kleben bleibt und Dauerkorona einsetzt, führt dies dazu, dass das Feld um die vorragende Spitze abgeschwächt und dadurch, bei positiver Leiterpolarität, die Gefahr eines die ganze Gasstrecke kurzschliessenden Funkens verkleinert wird. Auf diese günstige Auswirkung der stabilisierten Entladung auf das Durchschlagverhalten wird noch weiter unten eingegangen.

3.2 Wechselspannung

Im Wechselfeld sind die Teilchenbewegungen weniger gut zu übersehen. Die Coulombkraft versucht, ein im Raum befindliches geladenes Teilchen in rascher Folge vor- und rückwärts zu ziehen, was zu mehr oder weniger langen, von Pulsationen überlagerten Erhebungen über die Unterlage führt; die momentane Lage des Teilchens und die jeweilige Phasenlage der Spannung sind dabei von Bedeutung. Mit weiterer Erhöhung der Spannung gelangt das Teilchen möglicherweise bis zum Innenleiter und kann im weiteren, vielleicht sogar während mehrerer Perioden der Spannung, wieder zur Unterlage zurückkehren.

Aus Zeitdehneraufnahmen lässt sich der Weg des Teilchens in Funktion der Zeit rekonstruieren [14]. Auf elegantere Weise gelangt man zum gleichen Ziel durch Lösung der grundlegenden

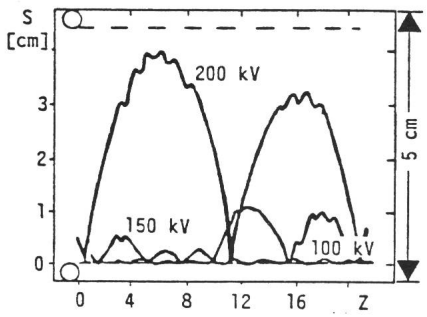

Fig. 5 Wegkurven eines 3-mm-Aluminiumkügelchens zwischen liegenden koaxialen Zylindern von 5 cm Elektrodendistanz für drei verschiedene Spannungswerte

S Sprunghöhe
Z Zahl der Perioden der angelegten Spannung

Bewegungsgleichung mit Hilfe eines Computers. Ein Beispiel dafür bietet Figur 5 für den Fall zweier koaxialer Zylinder (mit 15 bzw. 25 cm Durchmesser) bei drei verschiedenen Werten der anliegenden Spannung [15]. Das angenommene kugelförmige Teilchen erhebt sich bei einer Spannung, die wenig oberhalb des zum Abheben benötigten Wertes liegt, bestenfalls um 1 bis 2 mm über das Kapselungsrohr; bei Betriebsspannung wird es daher zu mehr als einem Hüpfen auf der Unterlage kaum reichen. Hingegen vermöchte es bei doppeltem Spannungswert bis in die Nähe des Hochspannungsleiters zu gelangen. Falls es diesen erreicht, zeigen die Beobachtungen, dass es dort oft unter leichtem Hin- und Herpendeln hängenbleibt und erst nach einiger Zeit wieder zur Unterlage zurückfällt. Ob es dabei zu Fusspunktentladungen kommt, hängt von der Differenz der Potentiale von Teilchen und Unterlage ab: Beim Abheben bestimmt die Phase der Spannung die mitgenommene Ladung, zum Mikrodurchschlag wird es nur im Bereich des gegenphasigen Scheitels der angelegten Spannung kommen. Über weitere Abhängigkeiten der maximalen Sprunghöhe von den Versuchsparametern wird in [16] berichtet.

Bei erhöhter Frequenz der angelegten Wechselspannung (bis zu einigen hundert Hertz), wie dies bei der Spannungsprüfung von Anlageteilen vor Ort in Serieresonanz des Prüfkreises vorkommen mag, ist die Hin- und Herbewegung im Elektrodenraum eher schwächer, und die Teilchen bleiben länger am Innenleiter hängen oder hüpfen vermehrt in seiner Nähe [17].

Die Dauer einer Blitzstossspannung ist zu kurz, um die Trägheit des Teilchens zu überwinden und es zum Abheben zu veranlassen. Falls es sich be-

reits frei im Raum bewegt, erfährt es durch den Impuls eine zusätzliche Ausrichtung. Eine Schaltspannung hingegen kann eher von Einfluss sein, vor allem bei kleineren Elektrodenabständen [18].

3.3 Nichtleitende Teilchen

Nichtleitende oder mit einer idealen Isolierschicht umhüllte leitende Teilchen können sich im elektrischen Feld nicht aufladen. Allein die molekulare Ausrichtung der in ihnen gebundenen Ladungen ist möglich, und es kann durch die bewirkte Polarisation eine Drehung des Körpers im Feld stattfinden, nicht aber seine Anhebung. Im Versuch wurde daher auch immer wieder festgestellt, dass es zur Bewegung im elektrischen Feld von dielektrischen oder oberflächenisolierten Teilchen wenn überhaupt nur mit sehr grosser Verzögerung dank einer gewissen Restleitfähigkeit kommt [8; 19] und daher auch der Einfluss dielektrischer Teilchen auf die Durchschlagfestigkeit einer Anordnung weit geringer als der leitender Teilchen ist. Der Fall einer eventuellen Aufladung eines auf einer isolierenden Zwischenschicht liegenden leitenden Teilchens durch im starken elektrischen Feld einsetzende Korona wird in [20] behandelt.

Eine Möglichkeit zur Abwendung der von leitenden Partikeln in druckgasisolierten Anordnungen ausgehenden Gefahr böte deren Umkleidung durch isolierende Schutzschichten. Vorgeschlagen wurde hierzu bereits, im Kapselungsraum eine Niederdruck-Glimmentladung in einer geeigneten Dampfatmosphäre brennen zu lassen, deren Zersetzungsprodukte sich zur gewünschten Hülle auf den vorhandenen Teilchen niederschlagen [21].

4. Die Erniedrigung der Durchschlagfestigkeit im Gasraum

4.1 Die hauptsächlichen Einflussgrössen

Gemäss den bisherigen Ausführungen ist zu erwarten, dass für das Verhalten und die Auswirkung fester Teilchen im Gasraum auf die Spannungsfestigkeit vor allem die Art der vorhandenen Teilchen, ob leitend oder isolierend, deren Zahl, Grösse und Form und ihr jeweiliger Aufenthaltsort von ausschlaggebender Bedeutung sind, ferner, ob sich Hochspannungsleiter und Kapselung horizontal liegend

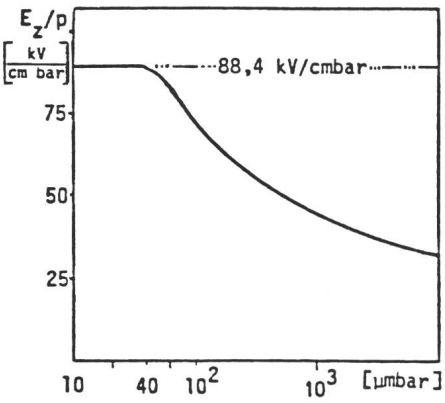

Fig. 6 Auf den Druck bezogene Zündfeldstärke E_Z/p des Homogenfeldes in Abhängigkeit vom Produkt aus Gasdruck und Höhe h der Kuppe auf einer Elektrode

oder in geneigter oder lotrechter Lage befinden. Von einigem Einfluss sind auch das spezifische Gewicht der Partikel, die Art des Füllgases und dessen Druck und selbstverständlich die Abmessungen des Gerätes sowie die Art und Dauer der einwirkenden Spannungen und damit, ob potentiell gefährliche Partikel überhaupt bis zur kritischen Zone in Innenleiternähe zu gelangen vermögen. Schliesslich ist auch noch auf alle etwaigen Massnahmen zur Verkleinerung der von den Fremdteilchen ausgehenden Gefahren hinzuweisen.

Unter den praktisch realisierbaren Reinheitsgraden im Gasraum, an den Elektroden und Isolatoren kommt dem Versuchsvorgehen im Prüffeld eine bedeutende Rolle zu. Insbesondere ist wichtig, ob nach einem Durchschlag der Ausgangszustand durch Reinigung oder Auswechslung der Elektroden und damit fast immer verbundenen Erneuerung der Gasfüllung wieder hergestellt wird oder ob ohne jeden Eingriff die Durchschläge mehrfach wiederholt werden. Der Erstdurchschlag pflegt vor allem bei höherem Gasdruck auf niedrigerem Spannungsniveau zu erfolgen als nachfolgende Durchschläge. Bei den Mehrfachfunkenzündungen werden an den Elektroden anhängender Staub oder zufällig im Durchschlagkanal befindliche Fäserchen weggebrannt und dadurch die weiteren Durchschlagwerte generell erhöht und ihre Streuung verkleinert. Erst nach öfters wiederholten Funkenübergängen zeichnet sich dann eine gewisse Tendenz ab, dass die Durchschlagfestigkeit wegen Kraterbildung an den Entladungsfusspunkten oder Verunreinigung des Gases oder der Elektroden durch abgedampftes Material oder Zersetzungsprodukte wieder absinkt.

Die grosse Streuung der elektrischen Festigkeit durch räumlich oder zeitlich auftretende Mängel und Schwachstellen im Durchschlagbereich, vor allem als Folge von im Gasraum schwebenden und zu den Elektroden gezogenen Teilchen, ist auch Ursache für die Abnahme der Festigkeit bei einer Vergrösserung der am Durchschlagvorgang aktiv beteiligten Elektrodenfläche bzw. des entsprechenden aktiven Volumens [22; 23; 24]. So muss unter den üblichen Arbeits- und Reinheitsbedingungen im SF_6-Gerätebau mit einem Rückgang der Durchschlag- bzw. Haltespannung um 6...10% bei einer Vergrösserung des Aktivvolumens um den Faktor 10 gerechnet werden. Desgleichen rührt auch ein gelegentlich berichteter Rückgang der Langzeitfestigkeit (über Tage, Wochen, Monate) [2; 22] vom zufallsweisen Auftreten von Fremdteilchen in den sensitiven Bereichen her. Dem ist allerdings entgegenzuhalten, dass unter Dauerspannung eher eine Verbesserung durch Wegbrennen kleiner Unsauberkeiten durch an diesen ansetzende Korona ohne weitere nachteilige Auswirkungen oder auch durch Zurückhalten umherwandernder Teilchen an Stellen geringer Feldstärke erwartet werden kann. So würde der Verfasser im Dauerversuch, bei Ausschluss trivialer Fehler wie z.B. einer unbemerkten kurzzeitigen Spannungsüberhöhung oder eines Druckabfalles, eher eine Verbesserung des Festigkeitsverhaltens im Gasraum als eine Abnahme erwarten.

Wird hier von bereits bestehenden Strukturmängeln der Elektrodenoberfläche (Riefen, Kratzer, anhaftender Schmutz) abgesehen und wird nur die Auswirkung beweglicher Fremdpartikel auf die dielektrische Festigkeit betrachtet, so werden solche vor allem bei Geräten mit waagrechter Achse und in Innenleiternähe zu Tiefdurchschlägen Veranlassung geben. Von Bedeutung ist dabei, ob das Teilchen bei ansteigender Spannung bereits Kontakt mit der Elektrode hatte und eine Vorentladung sich an ihm ausbilden kann oder ob es sich annähert und im Moment der Berührung oder kurz zuvor beim Mikrodurchschlag sprunghaft umgeladen wird[2]. Im ersten Fall

[2] Für die im Schrifttum gelegentlich vertretene Ansicht, die Mikroentladung begünstige die Zündung eines Durchschlages der Hauptstrecke, vermag der Verfasser keine stichhaltigen Argumente zu sehen.

der fest aufgesetzten Spitze kann sich am abgewandten Ende des Teilchens eine negative Raumladung ausbilden, was speziell bei positiver Polarität des Innenleiters zu erhöhter Funkenspannung führt, zumindest solange der Gasdruck einen Wert von rund 4...5 bar nicht übersteigt. Bei der stossartigen Umladung wie auch beim Anlegen einer Stossspannung von steilem Anstieg kann sich dagegen eine solche Ladungswolke nicht rasch genug aufbauen, und die Hauptentladung wächst unbehindert zur Gegenelektrode vor; eine starke Erniedrigung der Durchschlagspannung ist die Folge.

Der Rückgang der Spannungsfestigkeit von SF_6-Isolieranordnungen bis auf sehr tiefe Werte durch das Vorhandensein vereinzelter oder auch mehrerer Fremdpartikel ist immer wieder im Versuch und gelegentlich auch durch Rückschläge im praktischen Einsatz bestätigt worden, womit die Gefährdung der Betriebssicherheit durch Schwebeteilchen, vor allem von solchen länglicher Form, zweifelsfrei erwiesen ist. Weniger offensichtlich ist hingegen die Ursache für die Einbusse an Festigkeit gegenüber dem nach der Gasphysik zu fordernden Idealwert bei tadelsfreier Reinheit einer Anordung, in der dann Fremdteilchen nicht mehr nachweisbar sind. Hier muss wohl aufgrund der eingangs dargestellten extremen Laborbemühungen um völligen Ausschluss von letzten winzigen Beigaben und analog zu neuesten speziellen Beobachtungen an Luftfunkenstrecken [25] angenommen werden, dass kaum noch zu erfassende Schwebeteilchen wie Staubreste oder feinste Fäserchen zu mikroskopischen Feldstörungen an den Elektroden Anlass geben oder sich im Feldraum zu Brücken zusammenfinden. Sie lösen hierdurch den Funken nicht mehr auf kürzestem Weg zwischen den Elektroden, sondern auf Umwegen und auch ausserhalb des erwarteten Feldbereiches und unterhalb des theoretischen Höchstwertes von 88,4 kV $(\text{bar cm})^{-1}$ aus. Die volle Ausnützung des an und für sich gegebenen Isoliervermögens des SF_6-Gases wird damit durch die praktischen Gegebenheiten vereitelt.

4.2 Quantitatives zum Festigkeitsrückgang

Wird als Nachbildung einer einzelnen Unebenheit auf der sonst glatten Elektrode eine aufgesetzte Halbkugel

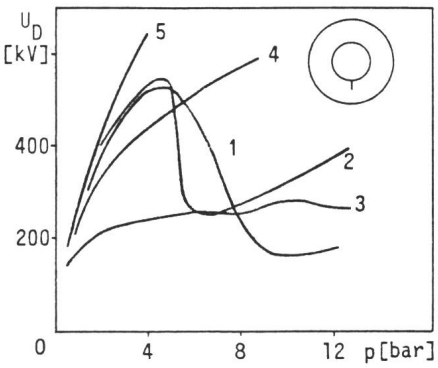

Fig. 7 Funkencharakteristiken für das Zylinderfeld (7,6/25 cm ∅) mit auf dem Innenleiter aufgesetztem Draht von 6 mm Länge [37]

1 betriebsfrequente Wechselspannung
2 positive Schaltspannung
3 positive Blitzspannung
4 negative Blitzspannung
5 negative Schaltspannung

angenommen, so lässt sich die davon bewirkte lokale Konzentration des elektrischen Feldes und daraus die Elektronen-Nettoproduktion bei der kritischen Feldstärke errechnen [26]. Das Ergebnis (Fig. 7) bestätigt den Erfahrungssatz, wonach zur Vermeidung von Vorentladungen im Homogenfeld die Unebenheit um so geringer bleiben muss, je höher der Gasdruck in einer SF_6-Anordnung angesetzt wird. Nur solange das Produkt aus Druck und Höhe der Erhebung einen Wert von etwa 50 μm bar nicht übersteigt, bleibt die Zündspannung unbeeinflusst. Bei einem Innendruck von beispielsweise 4 bar erfährt die elektrische Festigkeit demnach noch keine Beeinträchtigung, wenn die Höhe des Vorsprunges auf der glatten Leiterfläche weniger als etwa 10 μm ausmacht; bei einer Erhebung um 0,1 mm geht die Durchschlagspannung bereits auf wenig mehr als die Hälfte zurück. Diese Aussagen finden sich durch die Versuchsergebnisse voll bestätigt [27; 28].

Von der Elektrodenbearbeitung stammende Oberflächenrauhigkeit liegt oft in einer gewissen strukturellen Regelmässigkeit vor. Für eng nebeneinanderliegende Erhebungen ist die maximale Störung des elektrischen Feldes geringer als im Falle einer einzeln vorragenden Spitze gleicher Überhöhung. Über die Auswirkung von Drehriefen gibt eine japanische Veröffentlichung Auskunft [29]; bei einer Riefentiefe von 0,2 mm lag die Stosshaltespannung um 20% unter dem Bezugswert für polierte Oberflächen. Mit dem Druck nahm die Festigkeit um so weniger zu, je grösser die Unebenheiten waren. Durch Sandstrahlen hervorgerufene Erniedrigungen der elektrischen Festigkeiten werden in [30; 31] behandelt, solche durch Staub oder leitendes Pulver in [32].

Die Art der Prüfspannung, ob quasistationär oder impulshaft von raschem Frontanstieg, ist von erheblicher Bedeutung für den durch Fremdteilchen ausgelösten Durchschlag. Entscheidend ist, ob es zur Koronastabilisierung bei der positiven Spitzenentladung im Fall der fest aufgesetzten Spitze kommen kann oder diese wegen der plötzlichen Umladung bei der Berührung bzw. beim Mikrodurchschlag zum herantreibenden metallisch leitenden Teilchen unterbunden wird. Zum besseren Verständnis der Vorgänge wurden Versuche mit Drahtstückchen, die mit oder ohne einen schmalen Gasspalt auf den Innenleiter aufgesetzt waren, durchgeführt [33]. Die Figur 7 vermittelt die hauptsächlichen Ergebnisse für fest aufgesetzte Spitze im Druckbereich bis über 10 bar. Bei positivem Blitzstoss (1,2/50) nimmt die Funkenspannung oberhalb 2 bar mit dem Druck nur noch wenig zu. Dagegen steigen die Werte für Wechselspannung - der Durchschlag erfolgt in der positiven Halbschwingung - wie auch für positive Schaltspannung bis zu einem Höchst bei etwa 4 bar, um dann bei wenig höherem Druck brüsk abzufallen. Nur die negativen Impulswerte erhöhen sich stetig mit Steigerung des Gasdruckes.

Der Festigkeitsrückgang bei positiver Schaltspannung ist in Wahrheit noch grösser als in Figur 7 dargestellt, in der die fiktiven, im gegebenen Fall jedoch meist gar nicht erreichten Scheitelwerte der angewandten Impulsspannungen aufgetragen sind. Zur überwiegenden Mehrzahl erfolgen nämlich die Durchschläge bereits im Anstieg des Spannungsstosses bei Augenblickswerten bis herab zu einem Drittel der Scheitelhöhe [33]. Je nach den Zufälligkeiten im Vorkommen des Anfangselektrons im kleinen Ionisationsbereich um die Spitze erfolgt die Zündung entweder schon recht früh oder erst im späteren Verlauf des Spannungsanstieges; im erstgenannten Fall kann sich die stabilisierende Raumladung rechtzeitig aufbauen, während bei später Bereitstellung des Startelektrons das dann schon kräftige Feld die Entladung ohne wirksame Behinderung und unter günstigen Bedingungen für die weiteren Lawinen rasch vorwärtstreiben und den Durchschlag

erzwingen kann.

In ebensolcher Weise kommt es bei fast angekommenen Teilchen und Einleitung des Durchschlages der Hauptstrecke mittels Mikrozündung schon im Druckbereich von 3...5 bar zu einer kräftigen Erniedrigung der Funkenspannung bei Wechselspannung und positiver Schaltspannung bis zur Hälfte oder noch weniger der Werte für eine auf den Hochspannungsleiter aufgesetzte Spitze [1; 10; 32].

Für eine bestimmte Anordnung und einen vorgegebenen Druck ist die erreichbare Festigkeit natürlich von der Teilchenlänge abhängig. So nimmt sie bis zu 20 mm im Masse der Verlängerung auf weniger als ein Fünftel des Wertes der teilchenfreien Anordnung ab [1; 32], falls nur überhaupt das Feld zum Abheben und zum Durchqueren des Elektrodenzwischenraumes stark genug war.

Die Auswirkung der *Überlagerung* einer Impulsspannung über eine Gleich- oder Wechselspannung auf das Durchschlagverhalten einer teilchenverschmutzten SF_6-Anordnung wird in [34] behandelt. Wegen der sehr geringen Wahrscheinlichkeit für einen Aufenthalt des Teilchens in nächster Nähe des Innenleiters im Moment des Impulses ändert sich unter Wechselspannung die Durchschlagspannung kaum, recht deutlich jedoch bei Verunreinigung des Gases durch Metallpulver [32]; bei Gleichspannung hingegen liegt die Summendurchschlagspannung in jedem Fall tiefer, falls nur die Vorbeanspruchung zum Abheben des Teilchens reichte.

Die *Stosskennlinie* von SF_6-Systemen wird bei Auslösung des Durchschlages durch Vorsprünge auf der Leiteroberfläche oder ein angezogenes Teilchen als Folge der lokalen Feldverzerrung abgeändert. In einer sorgfältigen Studie über das Stossverhalten einer Zylinderanordnung von praxisnaher Abmessung und am Hochspannungsleiter hängendem Teilchen wurde für Stossspannungen von steilem Anstieg nachgewiesen [35], dass unter diesen Umständen die Zeit bis zum Durchschlag vor allem bei positiver Stosspolarität zunimmt und stärker streut als im ungestörten quasihomogenen Feld.

Ein isolierender Schutzüberzug auf der Hochspannungselektrode bewirkt eine Abschwächung des Nahfeldes im Gasraum und eine Drosselung der Energiezufuhr von Vorentladungen im

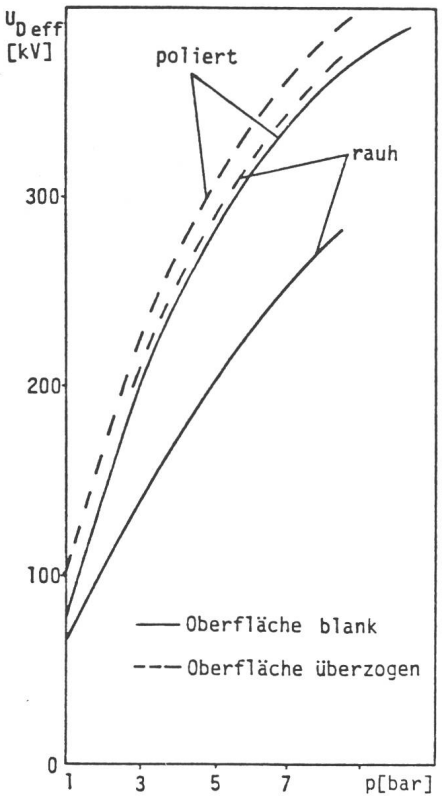

Fig. 8 Erhöhung der 50-Hz-Durchschlagspannung einer SF_6-Füllung im Zylinderfeld (⅔ cm ∅) durch einen 0,2 mm dicken isolierenden Überzug des Innenleiters [37]

Falle von Vorsprüngen oder Rändern von Kratzern wie auch generell bei Rauhigkeiten der Leiteroberfläche oder Staubbedeckung und führt auf eine merkliche Anhebung der Durchschlagspannung vor allem bei negativer Polarität [36; 37] und bei Wechselspannung [38]. Die Verbesserung macht unter Umständen bis zum Doppelten des Wertes ohne Überzug aus, ist aber eher bei 25% [39; 40] für aufgerauhte Oberflächen zu vermuten. Mit steigendem Druck nimmt der Effekt noch zu (Fig. 8). Der nachteilige Einfluss einer 1 mm tiefen Rille auf dem Leiter liess sich durch einen Überzug von 1 mm Dicke voll kompensieren [29]. All diese Aussagen gelten für den Erstdurchschlag. Nach Perforation der Deckschicht bei wiederholten Durchschlägen liegt die Durchschlagspannung niedriger, ohne allerdings unter den Wert bei unbedeckter Elektrode zu sinken [37]. Gegenüber frei beweglichen leitenden Partikeln bietet ein Isolierüberzug auf dem Hochspannungsleiter fast keinen Schutz, wohl aber auf der Innenseite der Kapselung wegen des dadurch erschwerten Abhebens [19; 29].

Literatur

[1] *S.J. Dale* and *M.D. Hopkins:* Methods of particle control in SF_6 insulated CGIT systems. IEEE Trans. PAS-101(1982)6, p. 1654...1663.

[2] *H.M. Ryan* and *D. Milne:* Breakdown performance studies in SF_6 under clean and contaminated conditions. Fourth International Symposium on High Voltage Engineering, Athen 1983; report No. 34.12.

[3] *R.G. Baumgartner:* Untersuchungen über die Gültigkeit des Ähnlichkeitsgesetzes in Schwefelhexafluorid. Dissertation der ETH Zürich No. 5997, 1977.

[4] *I.C. Somerville* and *D.J. Tedford:* Electrical breakdowns in compressed SF_6 between highly polished electrodes. Gaseous Dielectrics II. Proceedings of the Second International Symposium on Gaseous Dielectrics, Knoxville/Tennessee/USA, March 9...13, 1980, p. 210...217.

[5] *H. Fujanami* and *T. Takuma:* Removal of dust particles by circulating fluorocarbon liquid. Fourth International Symposium on High Voltage Engineering, Athen 1983; report No. 34.05.

[6] *N.-J. Félici:* Forces et charges de petits objects en contact avec une électrode affectée d'un champ électrique. Rev. Gén. Electr. 75(1966)10, p. 1145...1160..

[7] *F.A.M. Rizk, C. Masetti* and *R.P. Comsa:* Particle-initiated breakdown in SF_6 insulated systems under high direct voltage. IEEE Trans. PAS-98(1979)3, p. 825...836.

[8] *W. Schulz:* Der Einfluss frei beweglicher Fremdteilchen auf den Durchschlag im elektrischen Feld. Bull. SEV/VSE 70(1979)13, S. 673...678.

[9] *A.H. Cookson, O. Farish* and *G.M.L. Sommerman:* Effect of conducting particles on AC corona and breakdown in compressed SF_6. IEEE Trans. PAS-91(1972)4, p. 1329...1338.

[10] *A.H. Cookson* a.o.: Recherches récentes effectuées aux Etats-Unis sur l'effet de la contamination par des particules réduisant la tension de claquage des câbles isolés au gaz sous pression. Rapport CIGRE No. 15-09, 1976.

[11] *R.C. Blatcher* a.o.: A practical appraisal of the behaviour and detection of particle contamination in SF_6 gas insulated metal enclosed switchgar under operating conditions. CIGRE-Report No. 15-04, 1984.

[12] *M. Hara, T. Yamashita* and *M. Akazaki:* Microdischarge characteristics in air gap between spherical particle and plane. IEE Proc. 130A(1983)6, p. 329...335.

[13] *A. Diessner* and *J.G. Trump:* Free conducting particles in a coaxial compressed-gas-insulated system. IEEE Trans. PAS-89(1970)8, p. 1970...1978.

[14] *V. Berthold* and *J. Speck:* Zum Einfluss der Partikelbewegung bei Wechselspannung auf den Durchschlag von SF_6-Isolierungen. 22. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium 1977 Technische Hochschule Illmenau 22(1977)1, S. 113...116.

[15] *A.H. Cookson* and *O. Farish:* Particle-initiated breakdown between coaxial electrodes in compressed SF_6. IEEE Trans. PAS-92(1973)3, p. 871...876.

[16] *M.M. Morcos, K.D. Srivastava* and *H. Anis:* Dynamics of metallic contaminants in compressed gas insulated power apparatus. Fourth International Symposium on High Voltage Engineering, Athen 1983; report No. 34.02.

[17] *A. Bartnicki, H. Bergqvist* and *B. Gerdsberg:* Free conducting particles in SF_6 gas insulated apparatus at alternating voltage of different frequencies. Fourth International Symposium on High Voltage Engineering, Athen 1983; report No. 34.10.

[18] *V. Berthold:* Zum Einfluss der Spannungsform auf den partikelgezündeten Durchschlag von SF_6-Isolierungen. Elektrie 30(1976)8, S. 444...446.

[19] *B. Gänger:* Motion and effects of foreign particles in SF_6-insulated systems at high direct voltage. 1977 Annual Report. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, p. 456...469.

[20] *H. Parekh, K.D. Srivastava* and *R.G. van Heeswijk:* Lifting field of free conducting particles in compressed SF_6 with dielectric coated electrodes. IEEE Trans. PAS-98(1979)3, p. 748...758.

[21] *M.O. Peace, J.L. Adcock* and *L.G. Christophorou:* Particle contamination in gas-insulated systems: New control methods and mixtures. Fourth International Symposium on Gaseous Dielectrics, Knoxville/Tennessee/USA, 1984.

[22] *C.M. Cooke* and *R. Velasquez:* The insulation of ultra-high-voltage in coaxial systems using compressed SF_6 gas. IEEE Trans. PAS-96(1977)5, p. 1491...1497.

[23] *T. Nitta* a.o.: Influence d'une électrode et d'un isolateur solide sur l'amorçage dans le SF_6 comprimé. Rapport CIGRE 15-04, 1976.

[24] *C.M. Cooke* a.o.: L'isolation gazeuse pour les futures équipements de transport à très haute tension continue. Rapport CIGRE 15-14, 1982.

[25] *T.E. Allibone* and *J.C. Saunderson:* The measurement of high DC voltage. Fourth International Symposium on High Voltage Engineering, Athen 1983; report No. 62.05.

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

[27] *C.M. Cooke:* Ionization, electrode surface and discharges in SF_6 at extra-high-voltages. IEEE Trans. PAS-94(1975)5, p. 1518...1523.

[28] *S. Berger:* Onset or breakdown voltage reduction by electrode surface roughness in air and SF_6. IEEE Trans. PAS-95(1976)4, p. 1073...1079.

[29] *F. Endo* a.o.: Dielectric coating of electrodes and particle-initiated breakdown in SF_6 gas. Fourth International Symposium on High Voltage Engineering, Athen 1983; report No. 32.05.

[30] *E. Gockenbach:* Effect of the electrode surface on the breakdown performance of SF_6. Fourth International Conference on Gas Discharges, 7...10 September 1976, Swansea, p. 59...62.

[31] *S. Berger:* Investigations of the occurence of erratic low breakdown voltages in compressed air. IEEE Trans. PAS-96(1977)4, p. 1179...1189.

[32] *H. Kuwahara* a.o.: Effect of solid impurities on breakdown in compressed SF_6 gas. IEEE Trans. PAS-93(1974)5, p. 1546...1555.

[33] *S.J. Dale* and *R.E. Wootton:* Effect of fixed particle protrusions on 60 Hz and impulse breakdown voltage-pressure characteristics in SF_6. Third International Symposium on High Voltage Engineering, Milan 1979; report No. 32.10.

[34] *S. El-Dessouky* a.o.: Particle-initiated breakdown of SF_6 insulations at DC and AC voltage superimposed with switching impulse voltages. Fourth International Symposium on High Voltage Engineering, Athen 1983; report No. 32.01.

[35] *M.B. Eteiba* and *F.A.M. Rizk:* Voltage-time characteristics of particle-initiated impulse breakdown in SF_6 and SF_6-N_2. IEEE Trans. PAS-102(1983)5, p. 1352...1360.

[36] *C. Ikeda* and *B. Yoda:* Effect of electrode surface conditions and dust particles on the electrical breakdown of SF_6 gas. Electrical Engineering in Japan 91(1971)5, p. 67...74.

[37] *A.E. Vlastós* and *S. Rusck:* The influence of a thin electrode coating on the AC breakdown in SF_6. Fourth International Conference on Gas Discharges, 7...10 September 1976; Swansea; p 59...62.

[38] *S. Menju* and *K. Takahashj:* DC dielectric strength of a SF_6 gas insulated system. IEEE Trans. PAS-97(1978)1, p. 217...224.

[39] *A.E. Vlastós* and *S. Rusck:* Influence of coating polished and rough electrodes on the impulse and ac breakdown of SF_6. Gaseous dielectrics II. Proceedings of the Second International Symposium on Gaseous Dielectrics, Knoxville/Tennessee/USA, March 9...13, 1980, p. 210...217.

[40] *A. Inui* a.o.: Effect of electrode coating on impulse breakdown in SF_6. Fourth International Symposium on High Voltage Engineering, Athen 1983; report No. 32.04.