

Alternativgase für SF6

Autor(en): **Gänger, B.**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **73 (1982)**

Heft 5

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-904942>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

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

Alternativgase für SF₆

B. Gänger

546.226.161;

In der nachfolgenden Übersicht über die vielfältigen Bemühungen um Auffindung von Isoliergasen von noch besseren Eigenschaften, als sie Schwefelhexafluorid (SF₆) besitzt, wird aufgezeigt, dass es zwar eine Reihe von Gasen und Dämpfen teils erheblich höherer elektrischer Festigkeit gibt, die aber dafür andere Nachteile aufweisen wie vor allem zu hohe Verflüssigungstemperatur. Auch mit Gasmischungen ist es bisher nicht gelungen, die überragende Stellung des SF₆ als Füllgas für druckgasisolierte Hochspannungsschalt- und -verteilanlagen zu erschüttern.

Il existe des gaz isolants présentant de meilleures propriétés que l'hexafluorure de soufre (SF₆). En effet, toute une série de gaz et de vapeurs ont une rigidité diélectrique parfois nettement supérieure au SF₆, mais ils présentent tous d'autres inconvénients, notamment une température de liquéfaction trop élevée. Même des mélanges de gaz n'ont pas permis jusqu'ici de surpasser les remarquables propriétés du SF₆ sous pression. L'article présente quelques résultats des recherches en vue du remplacement du SF₆ par un gaz encore meilleur pour installations de couplage et de distribution à haute tension.

1. Einleitung

Die grosse Wertschätzung und weiter zunehmende Verbreitung von kompakten Hochspannungsschaltanlagen und Rohrkabeln mit Schwefelhexafluorid- (SF₆-)Druckgasisolation beruht auf der hohen elektrischen Festigkeit dieses Gases bei auch sonst vorteilhaften Eigenschaften. Die früher in speziellen Fällen zum gleichen Zweck verwendete Druckluft oder auch Stickstoff und Kohlendioxidgas für gewisse Anwendungen mehr physikalischer Art sind wegen der Notwendigkeit zu erheblich höheren Gasdrücken vom SF₆-Gas gänzlich verdrängt worden. Höherer Druck bedingt verstärkte Druckbehälter und führt ausser dem Risiko erhöhter Gasverluste noch zu einer grösseren Empfindlichkeit der Durchschlagfestigkeit auf Störungen der homogenen Feldstruktur wie etwa im Fall rauher Elektrodenoberflächen oder Verunreinigungen in den Isolierdistanzen.

Die höhere elektrische Festigkeit des SF₆ und anderer mit ihm vergleichbarer Gase beruht auf der speziell grossen Energieeinbusse der zum Aufbau einer Trägerlawine im Feld erforderlichen Elektronen bei unelastischen Stössen mit den Gasmolekülen und der bereitwilligen Anlagerung der so verlangsamten oder auch noch gar nicht auf hohe Geschwindigkeit gekommenen Elektronen durch die Moleküle. Die entstehenden negativen Ionen vermögen wegen ihrer Trägheit nichts zur Stossionisation beizutragen; der effektive Vermehrungskoeffizient $\alpha^* = \alpha - \eta$ wird damit in zweierlei Hinsicht reduziert, nämlich sowohl durch Verkleinerung des Ionisierungskoeffizienten α als auch durch die Vergrösserung des Anlagerungskoeffizienten η . Deswegen auch hängt das α^* im Durchschlagbereich in sehr viel stärkerem Mass von der Feldstärke ab als etwa bei den nichtanlagernden Gasen; in erster Näherung kann angesetzt werden, dass der Durchschlag eintritt, sobald $\alpha^* > 0$. Gegenüber den Vorgängen in den nicht oder nur schwach anlagernden (elektropositiven) Gasen bewirkt die Verringerung der kinetischen Energie und der Zahl der freien Elektronen eine starke Behinderung im Entladungsaufbau und führt auf eine höhere Durchschlagfeldstärke.

Die günstigen Eigenschaften des SF₆, nämlich

- recht hoher Sättigungsdampfdruck selbst noch bei niedrigen Aussentemperaturen
- gute Wärmeabführung von den stromführenden Leiterteilen an die Kapselung
- hohe chemische und zeitliche Stabilität unter allen vorkommenden Einwirkungen
- ungiftig, unbrennbar
- gute Verfügbarkeit bei erträglichen Kosten

neben dem hier ausser Betracht bleibenden herausragenden Lichtbogenlöschvermögen haben diesem Gas eine einzigartige Überlegenheit verschafft. Dessen ungeachtet setzte die Suche

nach anderen, möglichst noch vorteilhafteren Gasfüllungen bereits in der Erstzeit der neuen Isolationstechnik ein und wurde in den letzten Jahren verstärkt weitergeführt.

2. Untersuchte Gase

Viele Gase und Gas- bzw. Dampfmischungen wurden in zahlreichen Laboratorien daraufhin überprüft, ob sie das SF₆ abzulösen vermöchten. In erster Linie stand dabei das dielektrische Verhalten im Vordergrund des Interesses, die sonstigen Eigenschaften fanden zunächst keine oder nur geringe Beachtung. Weil die elektrische Festigkeit der Gase zumindest in einem begrenzten Bereich annähernd verhältnismässig mit dem einwirkenden Druck zunimmt (Beispiele in Fig. 1), ist bei der Verwendung in Freiluftgeräten vom Isoliergas eine genügend tiefe Verflüssigungstemperatur zu fordern. Nur dann besteht Gewähr dafür, dass der Druck im Gefässinnern auch ohne zusätzliche Erwärmung ausreichend hoch bleibt und die elektrische Festigkeit nicht unter einen gewissen Mindestwert absinkt.

Die Einwirkung des höchst aggressiven und besonders stark elektronegativen Elementes Fluor etwa auf Kohlenstoff oder Schwefel ergibt Verbindungen von grosser chemischer Stabilität bei sehr guter Widerstandsfähigkeit gegen zahlreiche Einflussfaktoren. Als Kühlmittel in Kälteaggregaten und Treib-

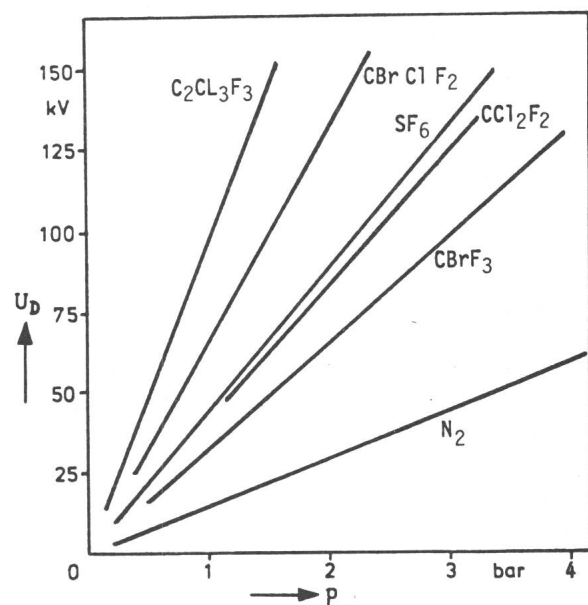


Fig. 1 Durchschlagspannung in Abhängigkeit vom Gasdruck für einige Gase und Dämpfe [15]
 $d = 5 \text{ mm}$

gase in Spraydosen haben solche fluorierten und meist auch halogenierten Kohlenstoffderivate weite Verbreitung gefunden, viele der Dämpfe zeichnen sich zudem durch hohe elektrische Festigkeit aus.

In Tabelle I findet sich eine Auswahl von bisher bezüglich ihrer Durchschlagspannung im homogenen elektrischen Feld untersuchten Gasen und Dämpfen. Angeführt sind die relative Durchschlagfestigkeit sowie die Siedetemperatur der Flüssigkeit bei atmosphärischem Druck. Man erkennt die Vorrangstellung des SF₆ gegenüber beispielsweise Stickstoff oder Kohlensäure durch sein rund 2,5faches Isoliervermögen; man sieht aber auch, dass sehr wohl auch andere Dämpfe von deutlich höherer elektrischer Festigkeit bekannt sind. So erreichen etwa chlorierte und fluorierte Kohlenwasserstoffe durchaus die anderthalbfache oder doppelte Festigkeit von SF₆, ebenso auch gewisse Nitrile (CN-Gruppe). Noch höher kommen hochmolekulare Fluor- und Perfluorkarbone. Jedoch geht aus der Zusammenstellung auch hervor, dass mit der elektrischen Festigkeit gemeinhin auch die Siedetemperatur ansteigt und ein mit einem solchen Gas isolierter Apparat unerwünscht hohe Arbeitstemperaturen erfordert.

Schon frühzeitig wurde die Vermutung geäußert, dass die komplexeren Moleküle bzw. diejenigen von grosser Kettenlänge und damit auch von hohem Molekulargewicht zu erhöhter elektrischer Festigkeit des Gases führen. Im Diagramm von Figur 2 sind für einige Reihen gleichgearteter, aber gesetzmässig abgewandelter Kohlenwasserstoffderivate (Reihen A bis E) die Siedetemperaturen über der jeweiligen elektrischen Festigkeit bei konstant gehaltenem *pd*-Wert aufgetragen. Bei dieser Darstellung wäre es wegen des vorgesehenen Verwendungszweckes erwünscht, wenn viele der erfassten Wertepaare sich rechts unten im Diagramm vorfänden. Tatsächlich ist aber der generelle Trend der Kurvenzüge derart, dass sie von links unten nach rechts oben verlaufen. Hohe Werte der elektrischen Festigkeit sind somit vorzugsweise von den Dämpfen mit hoher Verflüssigungstemperatur zu erwarten. Beispielsweise steigt bei der A-Reihe die Durchschlagspannung von C₈F₁₆ bis auf das 3½- und die von C₁₄F₂₄ gar bis zum 4fachen der von SF₆ gleichen Druckes; die Siedetemperatur des Kondensats übertrifft allerdings 100 bzw. 200 °C noch. Auch bei der B-Reihe vom Typ C_nF_{2n+2} wird etwa mit dem C₆F₁₄ und erst recht mit den höhermolekularen Perfluorkarbonen eine höhere Festigkeit als mit SF₆ erreicht, wiederum aber nur unter Inkaufnahme hoher Siedetemperaturen. Man entnimmt Figur 2 ferner, dass die Substituierung eines H-Atoms durch ein Fluor- oder Chloratom höhere Festigkeit verspricht; in gleicher Richtung wirkt auch die Ersetzung eines Fluor- durch ein Chloratom. Auch Nitrilverbindungen ergeben recht günstige Werte bei unter Umständen noch erträglicher Siedetemperatur.

Bei einer druckgasisolierten Anlage ist der Arbeitsdruck nach oben begrenzt durch die mechanische Festigkeit der Behälter bzw. die einzuhaltende Sicherheitsmarge bis zum Berstdruck und ferner durch die mit dem Druck zunehmende Empfindlichkeit des Isoliervermögens auf Oberflächenrauigkeiten und ungewollte Verunreinigungen im Innern des Apparates. Die untere Grenze ist durch die zu fordernden Mindestdurch- und Überschlagspannungen bei der tiefsten Umgebungstemperatur gegeben. Nur im Falle idealer Gase, d.h. bei weitem Abstand vom Siedepunkt, bliebe die Dichte des eingeschlossenen Isoliergases unverändert, und ein Temperaturrückgang

Kennwerte einiger Gase und Dämpfe, geordnet nach zunehmender relativer Durchschlagfestigkeit (SF₆ = 1,00)

Tabelle I

Chemische Formel	Durchschlagfestigkeit	Siedetemperatur (°C)	Referenzen
CO ₂	0,35	- 79	-
N ₂	0,40	- 196	-
N ₂ O	0,50	-	[1, 2]
CH Cl F ₂	0,47 und 0,52	- 41	[3, 4]
CCl F ₃	0,55 und 0,61	- 81,5	[3, 4, 5]
CBr F ₃	0,69	-	[6]
C ₂ F ₆	0,80	- 78	[5, 7, 8, 9, 10]
C ₃ F ₈	0,9	- 37,5	[5, 8, 11, 12, 13, 14]
C ₃ F ₆	0,94	-	[10]
SF ₆	1,00	- 64	-
CCl ₂ F ₂	0,95...1,05	- 30	[3, 4, 6, 15, 16]
CF ₃ -CF≡CF ₂	1,06	-	[17]
Se F ₆	1,10	- 49	[18]
C ₂ Cl F ₅	1,16	- 39	[5, 10]
C ₄ F ₁₀	1,2 und 1,32	- 2	[7, 8, 10]
cC ₄ F ₈	1,2 und 1,35	- 6	[7, 8, 19, 20, 21]
CF ₃ NO ₂	1,34	- 31	[16]
SO F ₂	1,42	- 44	[16]
CCl Br F ₂	1,50	- 5	[6, 15]
CF ₃ SF ₅	1,55	- 20	[16, 17]
CCl ₃ F	1,50/1,69/1,80	+ 25	[4, 6, 15]
C ₅ F ₁₂	1,2 und 1,9	+ 25 und + 29	[5, 22]
C ₆ F ₁₀	1,3 und 2,0	-	[10, 20]
iso C ₄ F ₈	1,91	-	[20]
C ₄ F ₆	2,0 und 2,1	- 5	[20, 21]
C ₂ Cl ₃ F ₃	2,0 und 2,24	+ 47	[6, 15, 23, 24]
C ₇ F ₁₆	2,1	+ 82	[12]
C ₇ F ₁₄	2,1 und 2,4	+ 76 und + 110	[12, 22]
CF ₃ C-CCF ₃	2,20	- 25	[16]
C ₃ F ₇ CN	2,3	+ 1 und - 2	[5, 26]
C ₆ F ₁₂	2,35	ca. + 70	[20]
CCl ₃ F ₃	2,5	-	[10]
CCl ₂ FCCl F ₂	2,5	+ 48	[10]
C ₈ F ₁₆ O	2,55 und 3,1	+ 101	[11, 25, 26]
C ₇ F ₈	2,8	+ 102	[12]
C ₈ F ₁₆	3,4	+ 101	[12, 27]
C ₁₄ F ₂₄	4,0	+ 205	[12, 27]

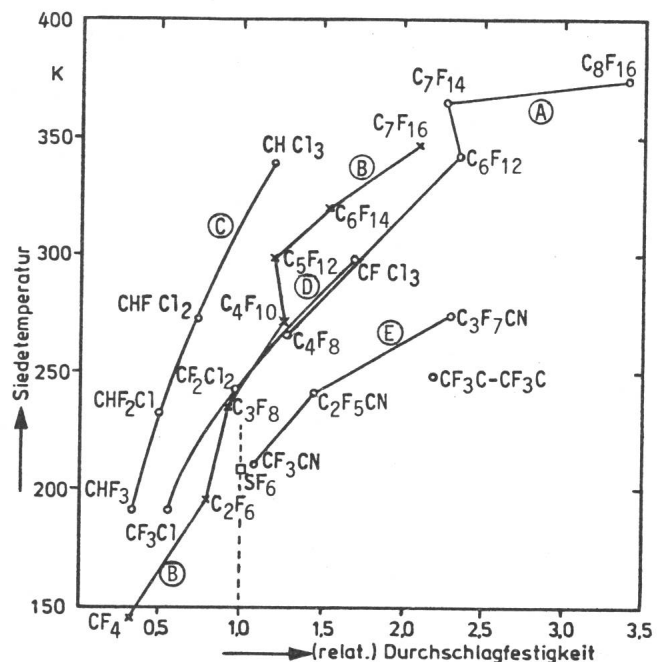


Fig. 2 Verflüssigungstemperatur und relative Durchschlagfestigkeit von Dämpfen (bezogen auf SF₆) [5]

pd = 0,66 bar mm

Die Kurvenzüge verbinden Messpunkte für Verbindungen vom Typ

- A: C_nF_{2n}
- B: C_nF_{2n+2}
- C: CHF_nCl_{3-n}
- D: CF_nCl_{4-n}
- E: C_nF_{2n+1}CN

hätte keine Auswirkung auf die Haltewerte. Mit der Temperatur steigt der Dampfdruck über einer siedenden Flüssigkeit nahezu exponentiell an. Bleibt hier einmal ausser Betracht, dass die Annäherung an den Siedepunkt bereits zu einem Absinken der elektrischen Festigkeit wegen der Möglichkeit der Tröpfchenbildung an den Armaturen oder auf den Oberflächen der Isolatoren führen kann, so gilt mit der weiteren Annahme einer proportionalen Zunahme mit dem Druck für die in Abhängigkeit von der Temperatur maximal erreichbare Festigkeit in einer Gastrecke [5]

$$E_{\max} = E_{D0} \frac{293}{T} \cdot \frac{1}{p_0} \exp \left[\frac{A}{R} \left(1 - \frac{T_s}{T} \right) \right]$$

E_{D0} Elektrische Festigkeit im Normalzustand ($p_0 = 1 \text{ bar}$, $20 \text{ }^\circ\text{C}$)

A Verdampfungswärme der Flüssigkeit (bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$ und 1 bar)
 $\approx 88 \text{ J/K} \cdot \text{Mol}$

R Gaskonstante ($= 8,3 \text{ J/Mol}$)

T Absolute Temperatur (in K)

T_s Siedetemperatur (in K) bei Normaldruck

In Figur 3 sind die nach dieser Gleichung berechneten Kurven der Festigkeitszunahme mit der absoluten Temperatur für einige Gase (Dämpfe) aufgetragen. Oberhalb einer angenommenen Höchstgrenze des Arbeitsdruckes von hier $p = 4 \text{ bar}$ ist ihr weiterer Verlauf nur noch gestrichelt angegeben. Zur besseren Orientierung sind noch die Kurvenpunkte für $p = 3, 2$ und 1 bar markiert. Als Folge der angenommenen Begrenzung des Arbeitsdruckes knicken die Kurvenverläufe bei 4 bar ab, und das Isoliervermögen geht bei weiter steigender Temperatur im Masse der vorzunehmenden Dichteverminderung zurück.

Man entnimmt der Darstellung, dass beispielsweise eine Füllung mit CF_2Cl_2 (Dichlordifluormethan, Freon 12) unterhalb $T = 279 \text{ K}$ ($6 \text{ }^\circ\text{C}$) im Vergleich zu SF_6 in dielektrischer Hinsicht nachteilig wäre und erst bei höheren Temperaturen als gut gleichwertig gelten könnte. Falls die Arbeitstemperatur stets oberhalb 276 K bliebe, könnte die Verbindung CF_3SF_5 bezüglich Isoliervermögen als recht günstig bezeichnet werden. Vorteilhafter als SF_6 bei sehr tiefen Temperaturen wäre CF_3CF_3 (Hexafluoräthan, Freon 116), jedoch müsste bei Temperaturen über 239 K ($-34 \text{ }^\circ\text{C}$) eine Festigkeitseinbusse um rund 15% in Kauf genommen werden.

Ohne Berücksichtigung der im Betrieb zu erwartenden Temperaturen lässt sich daher kein aussagekräftiger Vergleich der elektrischen Festigkeitswerte der Dämpfe untereinander vornehmen und nur in einem oft recht engen oder für die praktische Anwendung uninteressanten Bereich kann, wenn überhaupt, von der Überlegenheit gewisser Isoliergase gegenüber dem SF_6 gesprochen werden. Natürlich sind daneben auch noch die sonstigen Eigenschaften des Alternativgases wie seine chemische Stabilität, Ungiftigkeit usw. in die Betrachtung miteinzubeziehen, was den Spielraum noch weiter einengt. Unter Berücksichtigung aller Aspekte ist es bisher nicht gelungen, ein Einzelgas zu finden, das unter den üblichen Arbeitsbedingungen dem SF_6 insgesamt gleichwertig oder gar überlegen wäre.

3. Gasmischungen

Mischungen zweier oder auch mehrerer Einzelgase bezwecken unter möglichster Erhaltung des von der stärkeren Komponente dargebotenen Isoliervermögens, den Arbeitsbereich des Gemisches durch Erniedrigung seiner Verflüssigungstem-

peratur zu erweitern und dabei vielleicht auch noch Kostenvorteile zu erlangen. In jüngster Zeit ist auch noch der Wunsch hinzugetreten, im Durchschlagkanal möglicherweise entstehende leitfähige feste Zersetzungsprodukte vermittels gewisser Beigaben zur Füllung in unschädliche Verbindungen überzuführen und ferner solche Gase einsetzen zu können, die auf Mängel der Elektrodenbeschaffenheit und des Gases nicht mit einem starken Rückgang der Durchschlagspannung reagieren. Der Grund für die in einem Gasgemisch erst bei tieferer Temperatur einsetzende Verflüssigung des SF_6 liegt darin, dass in einem abgeschlossenen Raum der Partialdruck eines Dampfes sich unbeeinflusst von der Anwesenheit weiterer Gase allein auf den von seiner Dampfdruckkurve gegebenen Wert einstellt und somit die Zumischung eines Gases zu SF_6 bei gleichgehaltenem *Gesamtdruck* zu einer Absenkung der Verflüssigungstemperatur des Gemisches führt.

Bei der Mischung nichtanlagernder Gase ändert sich die elektrische Festigkeit in Abhängigkeit vom Mischgrad linear zwischen den Ausgangswerten der Einzelgase, so wie dies die gestrichelte Gerade zwischen den beiden Festigkeitswerten der Reingase für negativen Blitzstoss in Figur 5 angibt. Die Beimischung eines elektronegativen Gases verursacht hingegen ein nichtlineares Verhalten derart, dass bereits geringste Beigaben die elektrische Festigkeit des Hauptgases stark erhöhen und diese sogar grösser wird, als aufgrund der Merkmale der Einzelgase zu erwarten wäre (Synergie-Effekt). Die Synergie kann im Falle wenig unterschiedlicher Festigkeitswerte der Einzelgase sogar dazu führen, dass die Mischung in elektrischer Hinsicht merklich fester ist, als es die Einzelkomponenten sind. Die Ursache hierfür ist in der bereits erwähnten Wechselwirkung der Elektronen mit den Molekülen des Gasgemisches zu suchen, dass nämlich die Elektronen den grössten Teil ihrer im elektrischen Feld aufgenommenen Energie bei unelastischen Stössen mit den Molekülen, ganz besonders an solche von grösserem Dipolmoment [28], verlieren und die bis in den Bereich thermischer Geschwindigkeiten verlangsamten Elektronen leicht von den SF_6 -Molekülen eingefangen (angelagert)

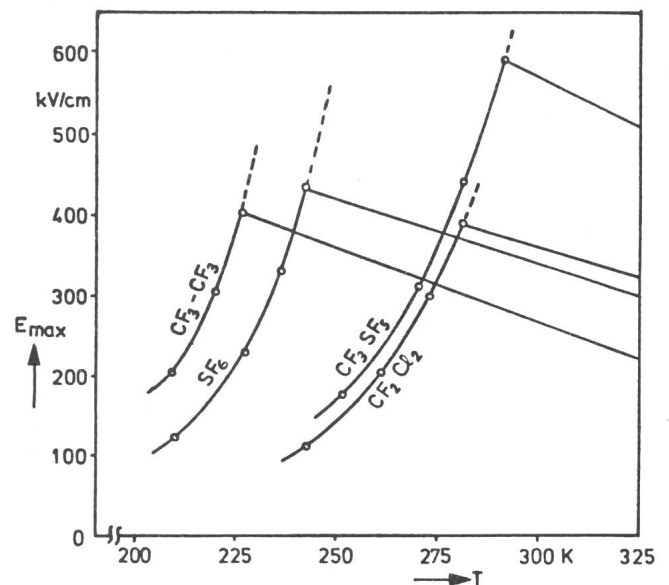


Fig. 3 Festigkeitszunahme eingeschlossener Dämpfe über ihrer siedenden Flüssigkeit mit der Temperatur, bei Begrenzung des Druckes auf $p = 4 \text{ bar}$ [16]

werden. Die in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit resonanzartig verlaufenden Wirkungsquerschnitte für die Streuung und die Anlagerungen führen so auf gegenseitige Beeinflussungen, die sehr von den jeweiligen Gaskomponenten abhängen.

Figur 4 gibt Messungen der Werte der Durchschlagspannung in der Paschen-Darstellung von Rein-N₂ und Rein-SF₆ wieder wie auch derjenigen im Zwischenbereich. Durch Zumischung von nur 1% SF₆ zu N₂ erhöht sich die Gasfestigkeit um rund 50%; Zugaben von mehr als 50% bewirken nur noch eine geringfügige [30...34] oder unter Umständen auch keine weitere Verbesserung mehr [35; 36]. Als Beispiel dafür mögen die Messungen nach Figur 5 dienen.

Wegen ihres hohen Anlagerungsvermögens für Elektronen des unteren Geschwindigkeitsbereiches und auch sonst günstigen Eigenschaften erscheinen die Perfluorkarbone als Gaskomponente selbst bei nur geringer Zumischung als besonders gut geeignet. Doch ergibt sich mit ihnen eine neue Schwierigkeit: Bei mehrmaligen Durchschlägen, wahrscheinlich auch bereits allein unter längerdauernder Koronaeinwirkung, schlägt sich auf den Kapselungsinneiteilen Russ in feinsten Verteilung als Folge der Abspaltung von atomarem Kohlenstoff in der Entladung nieder. Spaltprodukte dieser Art sind aber wegen der Gefahr der Kriechwegbildung höchst unerwünscht und sollten gleich nach ihrem Entstehen durch Bindung an andere Gaskomponenten unwirksam gemacht werden können. Durch geeignete Zusammensetzung der Füllung scheint es tatsächlich möglich zu sein, die Bildung von freiem Kohlenstoff weitgehend zu unterdrücken [28; 37; 38].

Insgesamt haben aber all die sehr zahlreichen Bemühungen um Auffindung praktisch verwertbarer Gasmischungen nicht den erhofften Erfolg einer das SF₆ übertreffenden elektrischen Festigkeit bei Verwendbarkeit bis zu tiefsten Aussentemperaturen gebracht. Zwar haben die Untersuchungen in mehrfacher Hinsicht die Kenntnisse von den Vorgängen bei der Stossionisation und dem Durchschlagverhalten der verdichteten Gase vermehrt, ohne jedoch auf jeden Anwendungsbereich zugeschnittene Gasmischungen von in der Summe günstigeren

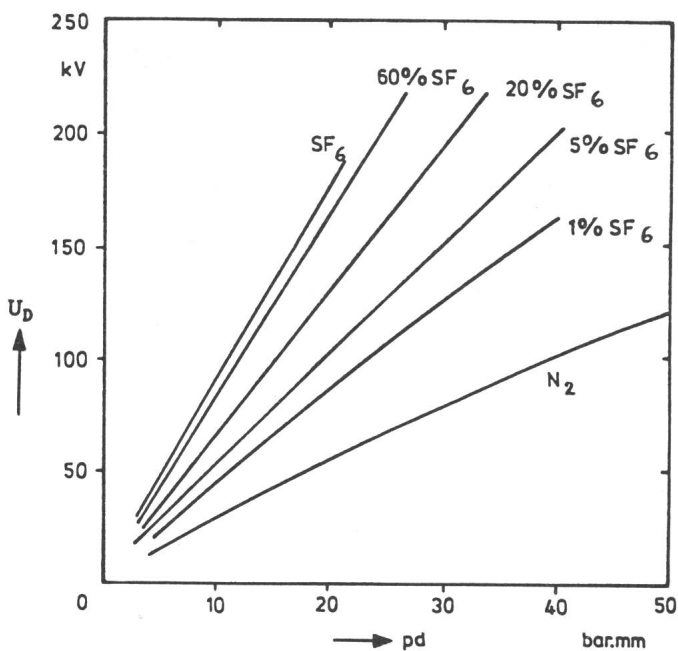


Fig. 4 50-Hz-Durchschlagspannung von N₂ und SF₆, rein und gemischt (Scheitelwerte) [29]

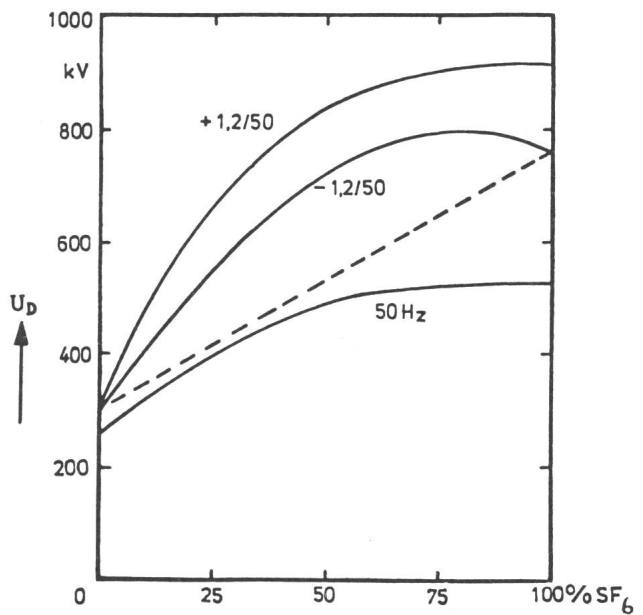


Fig. 5 Durchschlagspannungen bei Blitzstoss und betriebsfrequenter Wechselspannung (Scheitelwerte) bei variablem Mischgrad von N₂ und SF₆, bei 3,5 bar und 4,0 cm Plattenabstand [35]

Eigenschaften als etwa von SF₆ oder der Art N₂/SF₆ zu erbringen. Mit letzterer Mischung liessen sich Aussentemperaturen bis nahezu -50° C beherrschen und nicht unbeträchtliche Kosteneinsparungen beim Füllgas erzielen, doch kam es bisher trotz vieler dahin zielender Empfehlungen nicht einmal bei den dazu besonders geeignet erscheinenden Rohrkabeln zur praktischen Erprobung.

4. Die Verhältnisse im inhomogenen Feld

Die vorstehenden Betrachtungen beziehen sich auf das Verhalten der Gase und Dämpfe im näherungsweise homogenen Feld. Tatsächlich ist auch der Konstrukteur von Hochspannungsapparaten gerade bei druckgasisolierten Anlagen sehr bestrebt, durch eine wohlüberlegte und vielfach auch rechnergestützte Gestaltung der Teilanordnungen stärkere Feldkonzentrationen an den massgeblichen Stellen zu vermeiden. In der Praxis findet man vorzugsweise konzentrische Leiteranordnungen von nicht allzu grossen Radienverhältnissen, ferner Stützisolatoren mit vorgeschobenen gutgerundeten Einsätzen zur Vergleichsmässigung des Feldes an den Fassungsstellen und längs der Isolatoroberfläche sowie ausladende Abschirmungen an den Stellen funktionsbedingt vorragender Aktivteile. Diese sorgfältige Formgebung der Leiterteile und Armaturen sichern im Betrieb durchweg ein entladungsfreies Verhalten bis zu den höchsten vorkommenden Spannungen. Jedoch sind ungewollte erheblichere lokale Störungen des Feldverlaufes beim Vorkommen von Verunreinigungen im Gefäss nicht gänzlich auszuschliessen. So können sich Feinstverunreinigungen auf Isolierflächen absetzen, Metallsplitters oder dergleichen wandern zu Orten hoher Feldstärke und tanzen auf der Unterlage oder fliegen gar zum Hochspannungsleiter hin. Damit ist aber der Fall einer in den Raum vorstossenden Spitze gegeben, und es mag bereits bei mässig hoher Spannung zu Korona im Spitzenbereich kommen. Zur Klärung der dabei vorliegenden Verhältnisse sind die Anordnung Spitze-Platte oder eine ihr gleichkommende bei Druckgas-

isolation vielfach untersucht worden. Überdies wäre es sehr erwünscht, über Gasfüllungen verfügen zu können, deren elektrische Festigkeit im Betrieb durch das Vorkommen leitender Fremdteilchen oder von Unebenheiten auf den Elektrodenflächen nicht so stark beeinträchtigt wird, wie das bei dem auf einige Bar komprimierten SF₆ der Fall ist.

Generell darf das Verhalten von Elektrodenkonfigurationen mit einseitig verzerrtem Feld in einem stark elektronegativen Gas in den Grundzügen als geklärt gelten [39]. Bei negativer Spitzenpolarität steigt die Durchschlagspannung bis zu recht hohen Gasdrücken monoton an; eine ebensolche Stabilisierung durch die starke Raumladung der Vorentladungen mit resultierender hoher Festigkeit der Strecke geschieht hingegen bei positiver Spitze nur bis zu einem gewissen Druck. Bei Überschreiten des kritischen Wertes wird die Stabilisierung unwirksam, und aus der Koronahülle brechen Leuchtfäden hervor, was mit einem brüskem Rückgang der Durchschlagspannung bis in den Bereich der Einsetzspannung verbunden ist. Ein davon nur wenig verschiedenes Erscheinungsbild wird mit Wechsellspannung erhalten [40], auch beim Gemisch N₂/SF₆ [4; 29; 40]; bei Spannungsschoss ist der Festigkeitseinbruch meist weniger ausgeprägt [4; 41; 42; 43]. Der kritische Druck verschiebt sich zu um so tieferen Werten, je elektronegativer das Gas bzw. je grösser seine im Homogenfeld ermittelte elektrische Festigkeit ist.

In Figur 6 ist für SF₆ und eine 20% C₄F₈/80% SF₆-Mischung die Änderung der Durchschlagspannung bei positiver Spitze mit dem Druck bis 5 bar dargestellt. Die Zumischung des elektrisch festeren C₄F₈ hat nur eine leichte Verschiebung des Festigkeitsabfalls und des Minimums zu tieferem Druck zur Folge und einen rascheren Wiederanstieg der Festigkeit bei Druckerhöhung. Wird einer 40% SF₆/60% N₂-Mischung wenig C₄F₈ beigegeben, so wird hierdurch die ohnedies tief liegende Stossdurchschlagspannung bei positiver Polarität noch weiter erniedrigt, vermehrte Zugaben von C₄F₈ ziehen keine weitere Änderung nach sich [42]. Prinzipiell gleichartige Verläufe wurden für Mischungen von SF₆ mit CF₃SF₅ oder

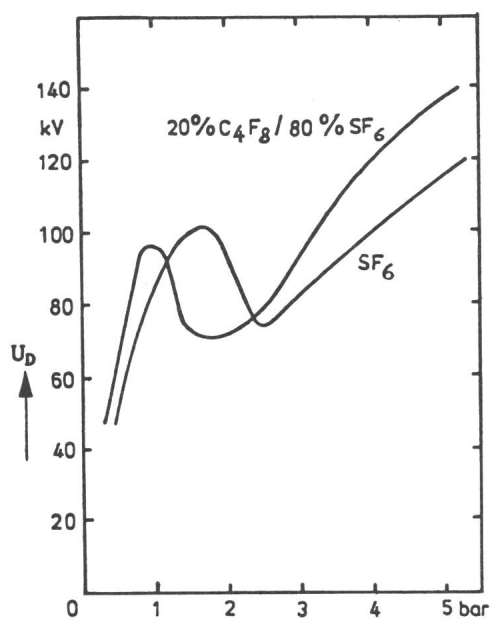


Fig. 6 Durchschlagspannung zwischen positiver Spitze und 1,5 cm entfernter Plattenelektrode in Abhängigkeit vom Druck für Rein-SF₆ und bei 20%iger Zumischung von C₄F₈ [37]

CF₃ClCF₂ für den Fall eines aus einer durchbohrten Fläche herausragenden Metallstifts und grossflächiger Gegenelektrode erhalten [29].

Eine unerwartet niedrige Stossfestigkeit von SF₆ ergab sich bei sehr langen Funkenstrecken (30 und 50 cm) vom Typ Stab-Platte. In diesem Fall des stark inhomogenen Feldes mit weit entfernter Gegenelektrode erreicht sie bei atmosphärischem Druck nur gerade knapp die Werte einer Füllung mit Stickstoff oder Luft und fällt bei geringer Zumischung (einige Prozent) von SF₆ zu N₂ noch weiter ab [44].

Nachdem somit bisher keine greifbaren Erfolge erzielt werden konnten, dem festigkeitsmindernden Einfluss von Fremdteilchen im Gasraum durch eine gezielte Zusammensetzung der Gasmischung entgegenzuwirken, und auch die Chancen dafür nicht gerade gross erscheinen, muss weiterhin darauf geachtet werden, bei der Fertigung der Kapselungsteile peinliche Sauberkeit und grösste Sorgfalt walten zu lassen; auch die Fertigstellung von Baugruppen in der Fabrik und deren blosser Montage an Ort und Stelle gehört zu diesen Massnahmen. Ferner versucht man, die nicht gänzlich vermeidbaren Fremdteilchen bewusst gestalteten feldentlasteten Stellen zuzuführen und sie dort zurückzuhalten und so unschädlich zu machen. Abschliessende Hochfrequenz-Ionisationsmessungen vermitteln schliesslich eine recht gute Vorstellung vom Erfolg dieser Bemühungen, Versager bei den Schlussprüfungen oder im Betrieb der Anlage zu vermeiden.

Literatur

- [1] J. Dutton, F.M. Harris and D.B. Hughes: Electrical breakdown of nitrous oxide. Proc. IEE 120(1973)8, p. 941...944.
- [2] R. Hackam, C. Raja Rao and G.R. Govinda Raju: Electrical breakdown of nitrous oxide. 4th International Conference on Gas Discharges, Swansea, 1976. IEE Conf. Publ. 143(1976), p. 209...211.
- [3] E.H. Cohen: The electric strength of highly compressed gases. Proc. IEE, Part A: Power Engineering 103(1956)7, p. 57...68.
- [4] P.R. Howard: Insulation properties of compressed electronegative gases. Proc. IEE, Part A: Power Engineering 104(1957)8, p. 123...138.
- [5] J.C. Devins: Replacement of gases for SF₆. IEEE Trans. EI 15(1980)2, p. 81...86.
- [6] E. Gockenbach and A. Wieland: The breakdown behaviour of some electronegative gases and gas mixtures. Third International Symposium on High Voltage Engineering, Milan 1979, paper No. 31.14.
- [7] G. Camilli, T.W. Liao and R.E. Plump: Rhe dielectric behavior of some fluorogases and their mixtures with N₂. AIEE Trans. Part I: Communication and Electronics 74(1955)21, p. 637...642.
- [8] J.F. Ahearn and A.G. Larsson: Fluorochemical gases and vapors as insulating and cooling media. 5th Electrical Insulation Conference, Materials and Application, Chicago 1963, p. 16...21.
- [9] S. Schreier: On the breakdown voltages of some electronegative gases at low pressures. IEEE Trans. PAS 83(1964)5, p. 468...471.
- [10] D.R. James, L.G. Cristophorou and R.A. Mathis: New unitary and multi-component gaseous dielectrics. Second International Symposium on Gaseous Dielectrics, 1980, Knoxville/Tennessee (USA). New York a.o., Pergamon Press, 1980; paper No. 16, p. 115...127.
- [11] N.M. Bashara: Some fluorinated liquid dielectrics. AIEE Trans. Part I: Communication and Electronics 72(1953)3, p. 79...85.
- [12] L.J. Berberich, C.N. Works and E.W. Lindsay: Electric breakdown of perfluorocarbon vapors and their mixtures with nitrogen. AIEE Trans. Part I: Communication and Electronics 74(1955)21, p. 660...666.
- [13] J.L. Moruzzi and J.D. Craggs: Measurement of ionization and attachment coefficients in C₃F₈. Proc. Phys. Soc. 82(1963)530, p. 979...985.
- [14] L.C. Whitman: Impulse voltage tests on air and C₂F₂. IEEE Trans. EI 1(1965)2, p. 44...48.
- [15] E. Gockenbach: The breakdown behaviour of some new gases and gas mixtures in uniform and nonuniform fields. Second International Symposium on Gaseous Dielectrics, 1980, Knoxville/Tennessee (USA). New York a.o., Pergamon Press, 1980; paper No. 17, p. 128...136.
- [16] R.E. Wootton, S.J. Dale and N.J. Zimmermann: Electric strength of some gases and gas mixtures. Second International Symposium on Gaseous Dielectrics, 1980, Knoxville/Tennessee (USA). New York a.o. Pergamon Press, 1980; paper No. 18, p. 137...148.
- [17] R.E. Wootton and S.J. Dale: 60 Hz breakdown characteristics of SF₆ and its mixtures with CF₃SF₅, CF₂CF₂ and He in non-uniform fields. 6th International Conference on Gas Discharges and their Applications, Edinburgh 1980. IEE Conf. Publ. 189(1980), p. 228...231.
- [18] A.A. Banks and A.J. Rudge: Selenium hexafluoride: Dielectric strength and some chemical properties. Nature 171(1953)4348, p. 390...391.
- [19] F.W. Blodgett: Properties of octafluorocyclobutane, a dielectric gas. AIEE Trans. Part I: Communication and Electronics 78(1959)41, p. 63...66.
- [20] D.R. James a.o.: Breakdown voltages of some new unitary and multi-component gas mixtures. Annual Report of the NAS-NRC Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Colonie/N.Y., October 17...20, 1977. Washington, National Academy of Sciences/National Research Council, 1977, p. 409...420.

- [21] *M.O. Pace* a.o.: Improved unitary and multicomponent gaseous insulators. IEEE Trans. EI 13(1978)1, p. 31...36.
- [22] *J.K. Nelson* and *R.J. Manterfield*: Sparking potentials in fluorocarbon vapours. Proc. IEE 124(1977)6, p. 586...588.
- [23] *E. Gockenbach*: Das Durchschlagverhalten von gasförmigem Trifluortrichloräthan. Bull. SEV/VSE 68(1977)24, S. 1314...1317.
- [24] *E. Gockenbach*: Elektrische Festigkeit einiger Freone und deren Mischungen mit Stickstoff und Schwefelhexafluorid. ETZ-A 99(1978)6, S. 328...331.
- [25] *A.H. Sharbaugh* and *P.K. Watson*: Breakdown strengths of a perfluorocarbon vapor (FC-75) and mixtures of the vapor with SF₆. IEEE Trans. PAS -(1964)2, p. 131...136.
- [26] *M.J. Mulcahy* a.o.: A review of insulation breakdown and switching in gas insulation. Insulation/Circuits 16(1970)9, p. 55...61.
- [27] *G. Camilli*: Gas-insulated power transformers. Proc. IEE. Part A: Power Engineering 107(1960)34, p. 375...382.
- [28] *L.G. Cristophorou*, *D.R. James* and *R.A. Mathis*: Dielectric gas mixtures with polar components. J. Phys. D: Appl. Phys. 14(1981)4, p. 675...692.
- [29] *M. Ermel*: Das N₂-SF₆-Gasgemisch als Isoliermittel der Hochspannungstechnik. ETZ-A 96(1975)5, S. 231...235.
- [30] *H. Itoh* a.o.: Measurement of the effective ionisation coefficient and the static breakdown voltage in SF₆ and nitrogen mixtures. J. Phys. D: Appl. Phys. 12(1979)12, p. 2167...2172.
- [31] *N.H. Malik* and *A.H. Qureshi*: Breakdown gradients in SF₆-N₂, SF₆-air and SF₆-CO₂ mixtures. IEEE Trans. EI 15(1980)5, p. 413...418.
- [32] *A.H. Cookson* and *B.O. Pedersen*: HV performance of mixture of SF₆ with N₂, air and CO₂ in compressed-gas-insulated equipment. 5th International Conference on Gas Discharges, Liverpool 1978. IEE Conf. Publ. 165(1978), p. 161...164.
- [33] *A.H. Cookson* and *B.O. Pedersen*: Analysis of the high voltage breakdown results for mixtures of SF₆ with CO₂, N₂ and air. Third International Symposium on High Voltage Engineering, Milan 1979, paper No. 31.10.
- [34] *A. Wieland*: Gasdurchschlagmechanismen in elektronegativen Gasen (SF₆) und in Gasgemischen. ETZ-A 94(1973)7, S. 370...373.
- [35] *W. Schmidt* und *D. Nguyen*: Elektrische Festigkeit von SF₆/N₂-Druckgas-mischungen. Internationales Symposium Hochspannungstechnik, Zürich 1975. Bericht Nr. 4.1-12, Vol. II, S. 385...389.
- [36] *R.G. Baumgartner*: Dielectric characteristics of mixtures of sulphurhexafluoride (SF₆) and nitrogen (N₂). 3rd International Conference on Gas Discharges, London 1974. IEE Conf. Publ. 118(1974), p. 366...369.
- [37] *R.Y. Pai* a.o.: Measurement of properties of perfluorocarbon/SF₆ mixtures relevant to applications. 6th International Conference on Gas Discharges and their Applications, Edinburgh 1980. IEE Conf. Publ. 189(1980), p. 232...235.
- [38] *I. Sauters*, *T.J. Havens* and *L.G. Cristophorou*: Carbon inhibition in sparked perfluorocarbon-SF₆ mixtures. J. Phys. D: Appl. Phys. 13(1980)-, p. 1283 to 1290.
- [39] *B. Gänger*: Der Gasdurchschlag im ungleichförmigen Feld. Bull. SEV/VSE 71(1980)23, S. 1281...1289.
- [40] *B. Bowier* et *B. Fallou*: Caractéristiques diélectriques de l'hexafluorure de soufre et des mélanges d'azote de d'hexafluorure de soufre. Rev. Gén. Electr. 75(1966)2, p. 174...182.
- [41] *N.H. Malik* and *A.H. Qureshi*: A review of electrical breakdown in mixtures of SF₆ and other gases. IEEE Trans. EI 14(1979)1, p. 1...13.
- [42] *R.Y. Pai* and *L.G. Cristophorou*: Impulse breakdown of c-C₄F₈/SF₆ and c-C₄F₈/SF₆/N₂. Second International Symposium on Gaseous Dielectrics, 1980, Knoxville/Tennessee (USA). New York a.o., Pergamon Press, 1980; paper No. 24, p. 190...199.
- [43] *O.E. Ibrahim* and *O. Farish*: Impulse breakdown and prebreakdown corona processes in SF₆ and SF₆/N₂ mixtures. Second International Symposium on Gaseous Dielectrics, 1980, Knoxville/Tennessee (USA). New York a.o., Pergamon Press, 1980; paper No. 11, p. 83...91.
- [44] *T. Watanabe* and *T. Takuma*: The breakdown voltage and discharge extension of long gaps in nitrogen-SF₆ and air-SF₆ gas mixtures. J. Appl. Phys. 48(1977)8, p. 3281...3287.

Adresse des Autors

Dr. Ing. habil. *Berthold Gänger*, Dufourstrasse 5, 5430 Wettingen.