

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:	74 (1983)
Heft:	3
Artikel:	Neue Isolergase für die Hochspannungstechnik : Untersuchungen im homogenen Feld
Autor:	Biasiutti, G. / Zaengl, W.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-904759

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: 26.01.2026

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

Neue Isoliergase für die Hochspannungstechnik – Untersuchungen im homogenen Feld

G. Biasiutti, W. Zaengl

Die vorliegende Arbeit ist ein Beitrag zur Abklärung der praktischen Anwendbarkeit einiger sog. neuer Isoliergase. Die hier gewonnenen Daten basieren auf Untersuchungen des Durchschlagsverhaltens im homogenen elektrischen Feld. Die Resultate zeigen, dass die betrachteten Komponenten keine generellen Alternativen zu SF₆ darstellen; hingegen zeichnen sich einige Gase oder Gemische ab, die das SF₆ für bestimmte Anwendungen ergänzen könnten.

Contribution à l'emploi pratique de quelques nouveaux gaz isolants. Les données indiquées sont basées sur des recherches du comportement au claquage dans un champ homogène. Les résultats montrent que les composants considérés ne constituent pas des alternatives générales au SF₆; quelques gaz ou mélanges pourraient cependant compléter celui-ci dans certains cas.

1. Einleitung

Das Isoliergas Schwefelhexafluorid (SF₆) ist chemisch sehr stabil, weitgehend ungiftig, besitzt eine tiefe Verflüssigungstemperatur und hat schon bei nur mässig hohen Drücken ein sehr gutes elektrisches Isolationsvermögen. Mit diesem Gas wurde die wirtschaftliche Konstruktion gekapselter Hochspannungsanlagen ermöglicht. Die Anforderungen an eine sichere und zuverlässige Energieversorgung in Groß-

städten und Ballungszentren haben dann auch die Einführung der SF₆-isierten Schaltanlagen und Rohrgaskabel wesentlich beschleunigt. Die nun seit mehr als 10 Jahren bestehenden sehr guten Erfahrungen mit dem Betrieb dieser Anlagen und die Tatsache, dass ihre wesentlichen Vorteile bezüglich Platzersparnis und Betriebssicherheit vor allem bei hohen Spannungen voll zur Geltung kommen, verstärkten den Wunsch nach einem noch vorteilhafteren Dielektrikum. Eine Verbesse-

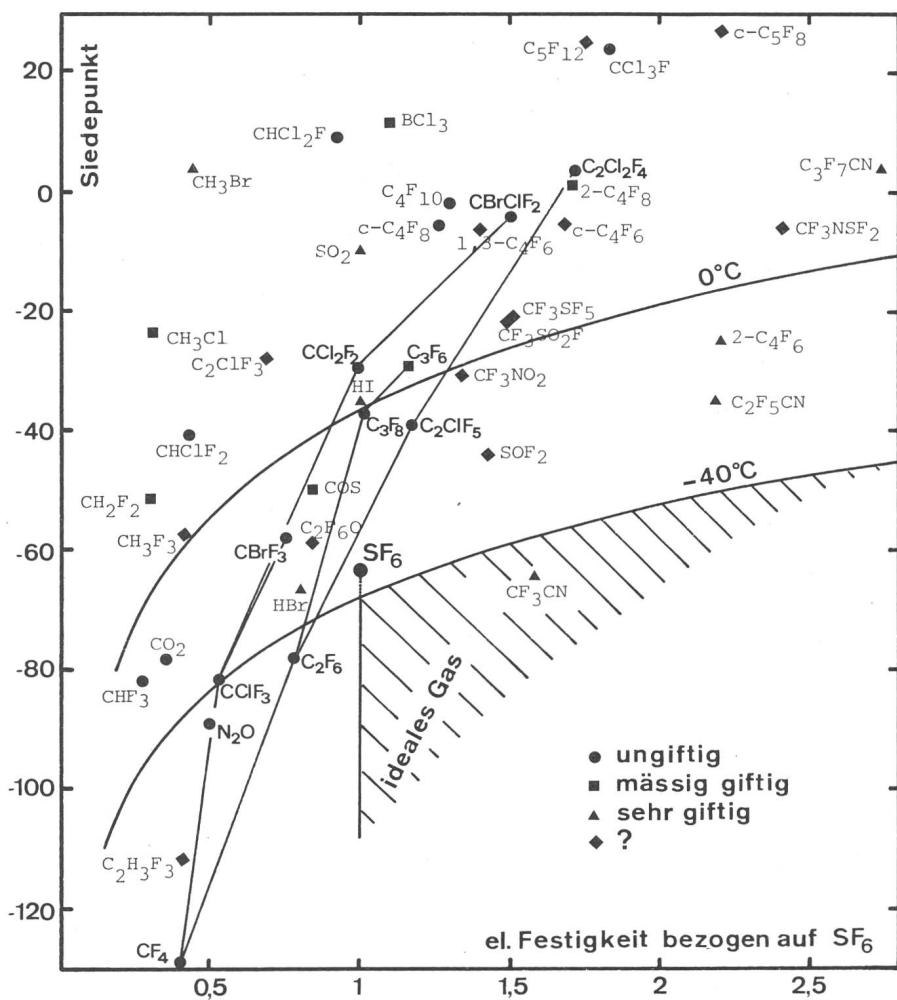


Fig. 1 Elektrische Festigkeit von Gasen bezogen auf SF₆ sowie deren Verflüssigungstemperatur bei 1 bar

In Anlehnung an [2]; ferner Daten aus [3; 4; 5] und eigene Untersuchungen

Adresse der Autoren

Dipl. Ing. Gianni Biasiutti und Prof. Dr. Walter Zaengl,
Institut für Elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik, ETH Zentrum, 8092 Zürich.

rung der Isolierfähigkeit wäre theoretisch natürlich auch bei SF₆ durch Erhöhung des Gasdrucks möglich; dagegen stehen aber einerseits eine entsprechende Erhöhung der Verflüssigungs-temperatur und andererseits erfahrungs-gemäß auch eine bedeutende Zunahme der Empfindlichkeit gegenüber Schmutzpartikel und Elektrodenrauhigkeiten. Aus dieser Sicht erscheint es somit aussichtsreicher, nach einem neuen Gas zu suchen, das das SF₆ bei üblichen Fülldrücken in grundsätzlich gleich konstruierten Anlagen ersetzen könnte.

Doch die Vorstellung, ein generell noch vorteilhafteres Gas zu finden, welches im praktischen Einsatz bedeutend höhere Betriebsfeldstärken zuließe, scheint aufgrund der heutigen Kenntnisse zu optimistisch zu sein [1]. Es ist nämlich eindeutig, dass von den bis jetzt untersuchten und praktisch auch anwendbaren Gasen SF₆ das weitaus günstigste Verhältnis von Verflüssigungstemperatur zu elektrischer Festigkeit aufweist. Diesen Umstand kann man leicht aus Figur 1 ersehen. Sie zeigt die auf SF₆ bezogenen relativen Durchschlagfestigkeiten verschiedener sog. «neuer» Gase im Vergleich zu ihren Siedepunkten. Die Figur enthält sämtliche grundsätzlich interessanten Gase, deren Festigkeiten hinreichend gut bekannt sind. Die Daten sind jedoch unterschiedlichen Publikationen entnommen und beziehen sich teilweise nicht auf gleiche Werte des Produkts von Gasdruck mal Schlagweite, so dass im Vergleich der Komponenten Ungenauigkeiten entstehen können.

Unter der Voraussetzung einer proportionalen Abhängigkeit der Durchschlagsspannung vom Druck und der vereinfachenden Annahme, dass die Verläufe der Dampfdruckkurven der einzelnen Gase schon alleine durch ihre Siedepunkte genügend charakterisiert sind, kann diese vergleichende Darstellung als druckunabhängig betrachtet werden. Somit besitzen zum Beispiel alle Gase, die im Bereich rechts von SF₆ liegen, bei gleichem Druck eine höhere Durchschlagfestigkeit als SF₆. Ferner ermöglicht die Darstellung einen groben Vergleich der Gase mit einer SF₆-Isolation, welche gemäß den heute üblichen Spezifikationen im Temperaturbereich bis -40 °C noch keine Verflüssigung aufweisen darf; dies bedingt einen Fülldruck von maximal 4,4 bar bei 20 °C. Diesem Vergleich dienen die beiden Linien (0 °C; -40 °C), die die Grenzen

der zwei folgenden Bereiche darstellen: Gase, welche unterhalb der mit 0 °C bezeichneten Grenzkurve liegen, können so stark verdichtet werden, dass sie theoretisch eine höhere Festigkeit als SF₆ mit der genannten Gasdichte besitzen, aber dennoch erst ab 0 °C oder darunter kondensieren. Analoges gilt für die zweite Kurve, jedoch für Kondensation erst ab -40 °C. Die beiden Grenzkurven basieren dabei auf einer nur vom Siedepunkt abhängigen Dampfdruck-Zustandsgleichung ([2]; vereinfachte integrale Form der Clausius-Clapeyron-Gleichung). Am Rande sei noch vermerkt, dass der Punkt für SF₆ nicht auf der entsprechenden Grenzkurve für -40 °C liegt, da dieses Gas bei 1 bar und -63,8 °C sublimiert. Für die Approximation der Dampfdruckkurve wurde deshalb ein fiktiver Siedepunkt von -68 °C errechnet.

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass das ideale Isolergas sich im Bereich rechts unten befinden müsste, denn dort liesse sich mit geringerem Fülldruck eine höhere Festigkeit erzielen als mit SF₆ unter den genannten Einsatzbedingungen. Das einzige bis jetzt bekannte Gas, das diese Bedingung erfüllt, ist die äußerst giftige Verbindung CF₃CN.

Für den Praktiker bedeutet dies also, dass sich in nächster Zukunft wohl noch kaum eine wirtschaftliche Alternative für SF₆ anbieten wird, es sei denn für Anwendungen, bei denen die Anforderungen hinsichtlich Temperatur und Druck von den heutigen Normen abweichen. Hingegen steht hier ein breites Forschungsgebiet offen, denn für eine objektivere Beurteilung der Anwendbarkeit neuer Isolergase bedarf es natürlich der Untersuchung ihres Verhaltens bei allen möglichen Beanspruchungen, denen ein solches Gas in der Praxis ausgesetzt sein kann: Impulsspannungen verschiedener Steilheit und Dauer, Wechselspannungen, Elektrodenrauhigkeiten und freie Partikel, Lichtbögen usw. Außerdem scheint es aus Gründen der durchschlagsbedingten Gasersetzung [6; 7] und des Dampfdruckverhaltens auch bedeutend erfolgversprechender zu sein, wenn man sich alternative gasförmige Dielektrika als Gemisch von zwei oder mehr Gasen vorstellt, welche sich gegenseitig günstig beeinflussen bzw. zusammen günstigere Eigenschaften besitzen. Dass dies durchaus möglich ist, weiß man zum Beispiel aufgrund von Untersuchungen des Gemisches SF₆/N₂ schon seit längerer Zeit [8].

Aus dieser sehr grossen Anzahl zu untersuchender Parameter und Komponenten soll im folgenden über ein grundlegendes Experiment berichtet werden, nämlich über Durchschlagsmessungen im homogenen Feld und über die Auswertung der Resultate. Obwohl versucht wird, möglichst viel Information aus diesem Experiment zu gewinnen, ist dies selbstverständlich im Gesamtrahmen solcher Untersuchungen nur ein kleiner Ausschnitt.

2. Grundlagen

Die Messung von Durchschlagsspannungen eines Gases im Homogenfeld bei Gleich- oder Wechselspannungen ist von der Theorie her betrachtet ein sehr einfaches Experiment. Dennoch sollen in diesem Abschnitt kurz die wesentlichen Grundlagen des Gasdurchschlags im homogenen Feld wiederholt werden, um daraus das experimentelle Vorgehen und die Basis für die Auswertung der Messungen abzuleiten.

Die Feldstärke, bei der in einem homogenen Feld ein Durchschlag auftritt, wird als elektrische Festigkeit des betreffenden Gases bezeichnet. Sie hängt von der Schlagweite *d* und dem Gasdruck *p* ab; im allgemeinen vom Produkt *pd*. Dagegen ist sie unabhängig vom Elektrodenmaterial und, sofern genügend Anfangselektronen vorhanden sind, weitgehend auch von der Spannungsform.

Für die Voraussage der Durchschlagsspannung bzw. der elektrischen Festigkeit eines Gases ist die Kenntnis von dessen effektivem Ionisationskoeffizienten $\bar{\alpha}$ in Funktion der Feldstärke *E* erforderlich. Beide Größen können dabei auf die Gasdichte oder – bei konstanter Temperatur – auf den Gasdruck *p* bezogen (reduziert) werden. Dieser Zusammenhang kann bei elektronegativen Gasen in einem engeren Bereich um $\bar{\alpha} = 0$ bekanntlich durch eine Gerade angenähert werden:

$$\frac{\bar{\alpha}}{p} = \beta \left[\left(\frac{E}{p} \right) - \left(\frac{E}{p} \right)_0 \right] \quad (1)$$

Dabei bedeutet $(E/p)_0$ den Schnittpunkt der Geraden mit der *E/p*-Achse, also jenen Wert, wo $\bar{\alpha} = 0$ ist, und β die Steigung der sog. Ionisationskennlinie, wobei diese zwei Werte bei den meisten bekannten Gasen druckabhängige Größen sind. Ferner können

die Kriterien, welche zur Zündung eines Durchschlages führen, vereinfacht durch die folgende Beziehung, das «Streamer-Kriterium», zusammengefasst werden:

$$\bar{\alpha} \cdot d = K \quad (2)$$

K ist dabei eine von den zum Durchschlag führenden Rückwirkungsprozessen abhängige Größe, die aber keinen allzu starken Änderungen unterliegt und daher meist als «Streamer-Konstante» bezeichnet wird. Wenn man nun die Ionisationskennlinie Gl. 1 in die Zündbedingungen Gl. 2 einsetzt, erhält man für die Durchschlagsspannung die Gleichung

$$U_D = \left(\frac{E}{p}\right)_0 pd + \frac{K}{\beta} \quad (3)$$

U_D ist also entsprechend der Paschen-Regel nur eine Funktion des Produkts $p \cdot d$, vorausgesetzt, $(E/p)_0$ und K/β sind konstante Größen. Gl. 3 stellt das sog. Weitdurchschlagsgebiet der Paschenkurve dar. Bei kleinen pd -Werten, also in der Nähe des Paschen-Minimums und darunter, gilt diese Gleichung wegen des vereinfachten, linearen Ansatzes für die Ionisationskennlinie jedoch nicht mehr.

Der Verlauf der Durchschlagsspannung in Abhängigkeit von pd wird also durch eine Gerade charakterisiert, die eine Steigung von $(E/p)_0$ aufweist und beim Wert K/β einen Schnittpunkt mit der U_D -Achse besitzt. Die Größe von K/β ist gasabhängig und liegt im Bereich von einigen 100 V bis etwa 3 kV; sie stellt im allgemeinen einen nur ganz kleinen Bruchteil der gemessenen Durchschlagsspannungen dar. Trotzdem ist sie eine für die weitere Auswertung dieser Messungen sehr wichtige Gaseigenschaft. Darauf soll später eingegangen werden.

Die Division von Gl. 3 durch das Produkt pd ergibt die auf den Druck bezogene Durchschlagfeldstärke E_D/p in Funktion von pd :

$$\frac{E_D}{p} = \left(\frac{E}{p}\right)_0 + \frac{K}{\beta} \frac{1}{p \cdot d} \quad (4)$$

Diese Art der Darstellung der elektrischen Festigkeit eines Gases («spezielles Ähnlichkeitsgesetz») ist bedeutend empfindlicher und aussagekräftiger als die vorhin beschriebene Paschen-Darstellung. Der Quotient K/β äußert sich hier in einer charakteristischen Krümmung der Kurve zu hohen Feldstärken bei kleinen pd . Bei größe-

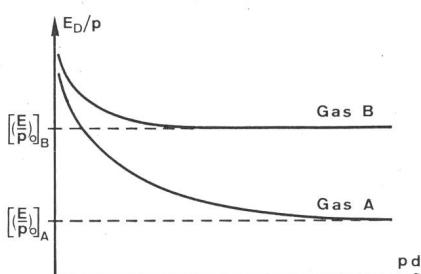


Fig. 2 Auf den Druck bezogene Durchschlagfeldstärke E_D/p in Funktion des Produkts von Druck und Schlagweite pd zweier beliebiger Gase

ren Werten von pd (Größenordnung ab etwa 2 bar · cm), die ja für die Praxis besonders interessant sind, nähert sich die Kurve asymptotisch dem Wert $(E/p)_0$, der kritischen auf den Gasdruck reduzierten Durchschlagfeldstärke. Theoretisch entspricht diese Feldstärke auch dem Wert, wo $\bar{\alpha}$ gleich null ist.

Wie Figur 2 zeigt, ist das Verhältnis der Festigkeiten zweier Gase aufgrund der unterschiedlichen Krümmung der Verläufe ihrer Durchschlagfeldstärken also pd -abhängig, so dass sie nicht nur durch je einen Messpunkt miteinander verglichen werden können. Es ist zweckmäßig, den Vergleich nach den kritischen, reduzierten Feldstärken vorzunehmen, da dieser Wert eine reine Materialeigenschaft darstellt; daher wird $(E/p)_0$ oft auch als *inhärente* elektrische Festigkeit bezeichnet. Eine direkte Bestimmung von $(E/p)_0$ mittels Durchschlagmessungen bei sehr hohen pd -Werten ist jedoch praktisch kaum durchführbar, da einerseits bei hohen Drücken die Gase bedeutend stärker auf kleinste Elektrodenrauhigkeiten und Staubteilchen reagieren und andererseits grösere Abstände recht grosse Elektroden bedingen würden. $(E/p)_0$ wird deshalb vorteilhaft durch Anpassung von Gl. 4 an eine

Serie von Durchschlagsmessungen in einem möglichst breiten pd -Bereich bestimmt. Dieses Vorgehen setzt voraus, dass $\bar{\alpha}/p$ des betreffenden Gases in der Nähe von $(E/p)_0$ durch eine lineare Funktion von E/p approximierbar ist und dass das Durchschlagkriterium nach Gl. 2 Gültigkeit hat. Neben $(E/p)_0$ erhält man dabei auch gleichzeitig den Wert des Quotienten K/β . (Die Werte K und β lassen sich aber nicht getrennt daraus ermitteln.) Die praktische Bedeutung dieser weiteren Gaseigenschaft ist Gegenstand der folgenden Abschnitte.

Beim ersten Betrachten eines Gases gilt das Interesse selbstverständlich zunächst der inhärenten elektrischen Fe-

stigkeit. Dennoch weiss man, dass in einer praktischen Anlage nur ein Bruchteil dieses Wertes (etwa 30...40%) zur Festlegung der Dimensionierungs-Feldstärke verwendet werden kann. Aus vielen Untersuchungen ist bekannt [9], dass lokale Feldstörungen («rauhe» Elektrodenoberflächen, bewegte Partikel) als Ursache dafür herangezogen werden müssen. Um zumindest qualitativ die Empfindlichkeit verschiedener Gase gegenüber solchen Störstellen miteinander vergleichen zu können, ist es wünschenswert, ein entsprechendes Qualitätsmerkmal zu finden, das nur auf bekannten Materialeigenschaften der Gase beruht. Auf diese Weise kann man sicher teilweise den sehr aufwendigen Messungen mit bekannten künstlichen Störstellen ausweichen.

Eine exakte quantitative Aussage über die Festigkeitsverminderung, welche eine bestimmte Störstelle verursacht, wird allerdings auf dem nachfolgend skizzierten Weg nicht möglich sein, denn dazu bedarf es der Kenntnis des genauen Feldverlaufs. Hingegen lässt sich ein Kriterium für das Einsetzen solcher Festigkeitsminderungen finden, das nur von der Gasdichte und einer die Feldstörung charakterisierenden geometrischen Größe abhängt.

Zur Ableitung dieses Kriteriums betrachtet man zunächst das in Figur 3 dargestellte Paar paralleler Platten-elektroden. Das homogene elektrische Feld werde dabei durch eine feste Metallspitze der Höhe h gestört, wobei h im Verhältnis zum Elektrodenabstand d oder zur Schlagweite z vernachlässigbar klein sei, so dass die Feldstärke nur in der unmittelbaren Umgebung der Spitze gestört wird, im restlichen Feldraum aber gleich gross bleibt. Ferner soll der Einfachheit halber die Störstelle als symmetrisch angenommen werden.

In einem inhomogenen Feld kann die Bedingung für den Entladungseinsetz bzw. für die Zündung eines

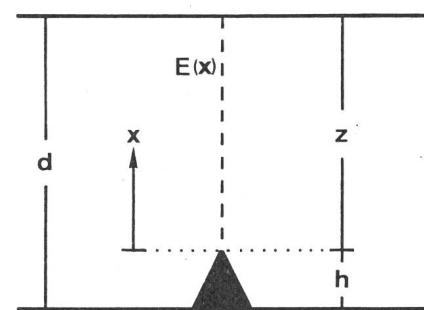


Fig. 3 Homogenes Plattenfeld mit lokaler Feldstörung

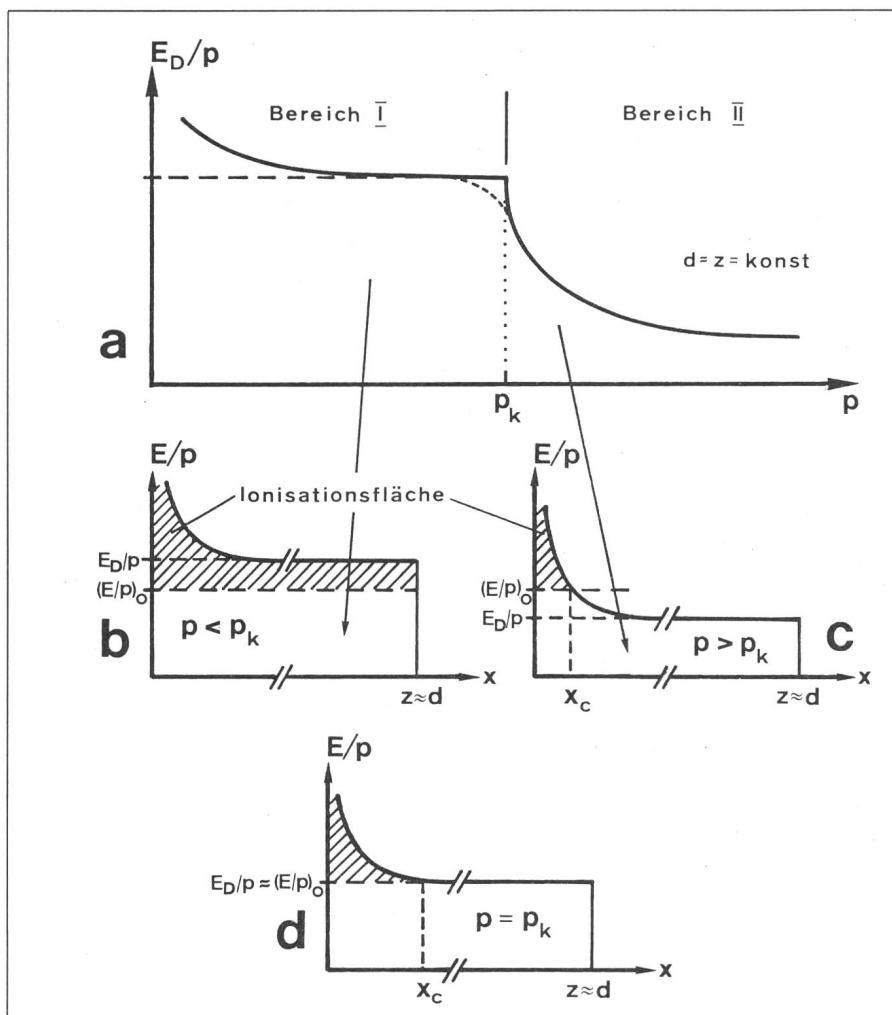


Fig. 4 Durchschlagfeldstärke E_D/p in Funktion des Drucks einer Homogenfeldanordnung mit fester lokaler Feldstörung (gemäss Fig. 3) (a). Verlauf der auf den Gasdruck bezogenen Feldstärke und Ausbreitung der Ionisationsfläche entlang der Linie höchster Feldstärke dieser Anordnung, unter und über dem kritischen Druck p_k (b, c, d)

Durchschlags bekanntlich in Analogie zu Gl. 2 in der Form

$$\int_0^{x_c} \bar{\alpha}(x) dx \geq K \quad (5)$$

geschrieben werden, wobei x_c die «kritische Lawinenlänge» bezeichnet. $\bar{\alpha}$ hängt über Gl. 1 stark vom Ort x (über $E(x)$) und dem Gasdruck p ab. Durch Zusammenfassung der Gleichungen 1 und 5 erhält man als Durchschlagkriterium

$$\int_0^{x_c} \left[\frac{E(x)}{p} - \left(\frac{E}{p} \right)_0 \right] dx \geq \frac{1}{p} \left(\frac{K}{\beta} \right) \quad (6)$$

Die Bedeutung dieser Beziehung wird am besten aus einer gedachten graphischen Integration ersichtlich, bei der die auf den Gasdruck reduzierte Feldstärke $E(x)/p$ entlang der Linie höchster Feldstärke als Funktion von x aufgetragen wird; Figur 4b-d [10].

(Fig. 4d). Bei weiter steigendem Druck sinkt dann aber E_D/p rasch unter $(E/p)_0$, erzwungen durch die Verkleinerung der «Ionisationsfläche» $(K/\beta)/p$ (Fig. 4c).

Dieser rasche Übergang von $x_c = z$ zu $x_c \ll z$, bei dem $E_D/p = (E/p)_0$ ist, erfolge bei einem kritischen Druck p_k . Bei diesem Druck kann man Gl. 6 mit $z = (d-h)$ auch wie folgt schreiben, wenn man $p = p_k$ setzt und eine Teilintegration durchführt:

$$\int_0^z E(x) dx - p_k d \left(\frac{E}{p} \right)_0 + p_k h \left(\frac{E}{p} \right)_0 \geq (K/\beta). \quad (6a)$$

Während das Integral die bei p_k am Elektrodensystem anliegende Spannung darstellt, ist auch das zweite Glied mit dieser Spannung identisch, da ja $(E/p)_0$ der Durchschlagfeldstärke E_D/p entspricht. Somit wird das gesuchte Kriterium für den Einsatz der von «mikroskopischen» Feldstörungen verursachten Abweichungen durch die noch verbleibenden Restglieder in Gl. 6a also

$$p_k h = (ph)_{\text{kritisch}} \approx \frac{(K/\beta)}{(E/p)_0} \quad (7)$$

beschrieben [11; 12]. Dies bedeutet, dass eine durch die geometrische Höhe h beschriebene Feldstörung so lange keinen Einfluss auf die Spannungsfestigkeit einer Gasstrecke ausübt, als das Produkt (ph) kleiner ist als der angegebene Quotient, der lediglich spezifische Gas- oder Materialeigenschaften enthält. Da ähnliche Überlegungen auch in schwach inhomogenen Isolieranordnungen, wie z.B. koaxialen Anordnungen, auftreten, wird man bei Durchschlaguntersuchungen an Anordnungen mit sonst vorgegebener makroskopischer Geometrie praktisch immer die in Fig. 4a skizzierte Abhängigkeit von $(E_D/p) = f(p)$ finden.

Obwohl dabei die im Bereich II auftretenden Absenkungen wesentlich durch den jeweiligen Feldverlauf der dominanten Störstelle mitbestimmt werden, kann man qualitativ sagen, dass der bei einem bestimmten Gas zu erwartende Festigkeitsverlust um so grösser sein wird, je kleiner der durch Gl. 7 definierte Quotient zahlenmäßig ist. Somit hat sich auch der Kreis zu den Messungen im idealen Homogenfeld wieder geschlossen, denn damit können $(E/p)_0$ und K/β ermittelt werden.

3. Versuchsaufbau

Als Prüfgefäß diente ein Glaszyylinder mit etwa 80 l Volumen, der für Wechselspannungen bis 300 kV und Betriebsdrücke bis 2 bar ausgelegt war. Das Elektrodensystem bildete ein Paar Chromstahl-Plattenelektroden mit Rogowski-Randprofil mit einem Durchmesser von 15 cm. Die Schlagweite konnte im Bereich bis 2 cm verstellt werden. Die Elektroden wurden mit einer UV-Lampe durch ein Quarzseitenfenster bestrahlt.

Während der prinzipielle Aufbau der Messapparatur bestehend aus Transformator, Teiler und Prüfgefäß sehr einfach ist, liegt die Hauptschwierigkeit in der optimalen Begrenzung der Durchschlagenergie, um die Elektrodenerosion und vor allem die Zersetzung der Gase zu verhindern. Diese Energiebegrenzung wird durch zwei Massnahmen erzielt: Zunächst begrenzt ein im Gefäßinnern in unmittelbarer Nähe der Elektroden befindlicher Dämpfungswiderstand den Durchschlagstrom und verhindert einen totalen Spannungszusammenbruch am Prüfgefäß. Weiterhin wird die in den Streukapazitäten gespeicherte Energie auf eine Parallelfunkstrecke kommutiert, die vom Durchschlagstrom innerhalb etwa 150 ns getriggert wird.

Um den Zustand der Prüfelektroden im Laufe der Untersuchungen zu überwachen, wurden periodisch Messungen in SF₆ beim höchstmöglichen pd durchgeführt und mit den nach Gl. 4 berechneten Werten verglichen. Dieses Gas würde ja äußerst empfindlich auf eventuelle im Laufe der Untersuchungen entstandene Rauhigkeiten reagieren. Auf diese Weise war sichergestellt, dass die Ursache von Fehlern nur bei der Messung der Spannung, des Drucks und der Schlagweite liegen konnte. Der totale Fehler dürfte damit $\leq 1\%$ gewesen sein.

höhere Ordnung unterscheiden. Dadurch könnte es möglich sein, Zusammenhänge zwischen bestimmten elektrischen Eigenschaften und der Molekülstruktur aufzudecken. Allgemein umfasst diese Gruppe die meisten in Figur 1 eingetragenen Gase, die ein günstiges Verhältnis von elektrischer Festigkeit zu Siedepunkt besitzen, aber dennoch nicht sehr giftig sind.

4. Gasauswahl

Die Grundlage hierfür bildete hauptsächlich Figur 1, wobei neben der elektrischen Festigkeit und dem Siedepunkt auch die Giftigkeit und die chemische Stabilität Hauptauswahlkriterien darstellten. Letztlich waren dann aber zum Teil auch die Verfügbarkeit oder der Preis entscheidend bei der Beschaffung. So standen CF₄, CC₂F₃, CBrF₃, CC₂F₂, CBrC₂F₂, C₂F₆, C₂ClF₅, C₂Cl₂F₄, C₃F₈, C₃F₆, N₂O und SF₆ zur Verfügung. Ausser N₂O und SF₆ gehören alle Gase zu einer Gruppe von Halogen-Kohlenstoff-Verbindungen, in der sich jeweils benachbarte Komponenten nur durch ein Atom oder durch die nächst-

5. Messungen

Entsprechend dem beschriebenen Vorgehen zur Ermittlung von $(E/p)_0$ und K/β bedarf es dafür einer Serie von Durchschlagmessungen über einen möglichst breiten pd -Bereich. Vorgängig muss aber bei jeder Komponente abgeklärt werden, ob diese beiden Gaseigenschaften einheitliche Größen darstellen oder ob allenfalls eine Druckabhängigkeit besteht. Dies bedingt eine Überprüfung der Paschen-Regel, welche zum Beispiel durch Messung der Durchschlagsspannung bei konstantem pd und variablem Druck vorgenommen werden kann. Genaugenommen sollte man zwar im Fall von realen Gasen nicht vom Druck, sondern von der Dichte sprechen. Deshalb wurde auch der Zusammenhang zwischen Druck und

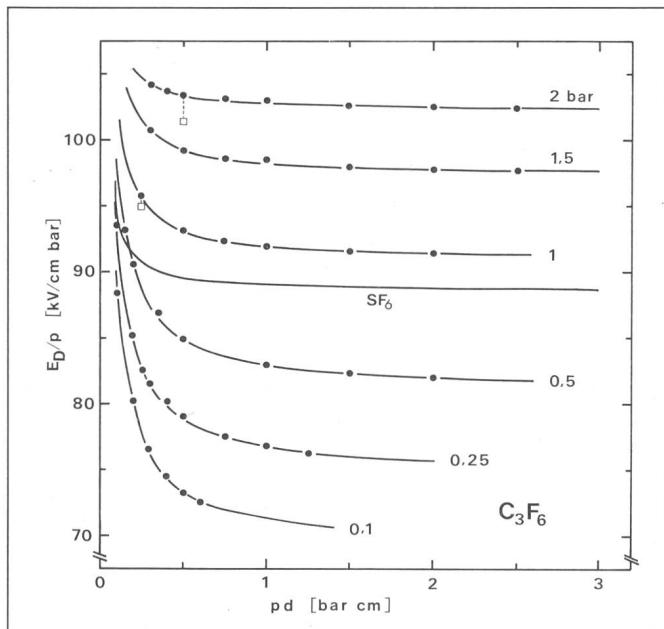


Fig. 5 Auf den Druck bezogene Durchschlagfeldstärken in Funktion des Produkts von Druck und Schlagweite pd in SF₆ und C₃F₆ bei verschiedenen Drücken (bezogen auf 20 °C)

Die Kurven entsprechen den Approximationen gemäß Gl. 4
● Diese Arbeit; $p = 0,1-2$ bar/20 °C; $d = 0,15-2$ cm sowie 1-6 cm
□ Chen et al. [15]; $p = 1$ bar, 2 bar/23 °C; $d = 0,254$ cm (Werte für 3 und 5 bar siehe Fig. 8)

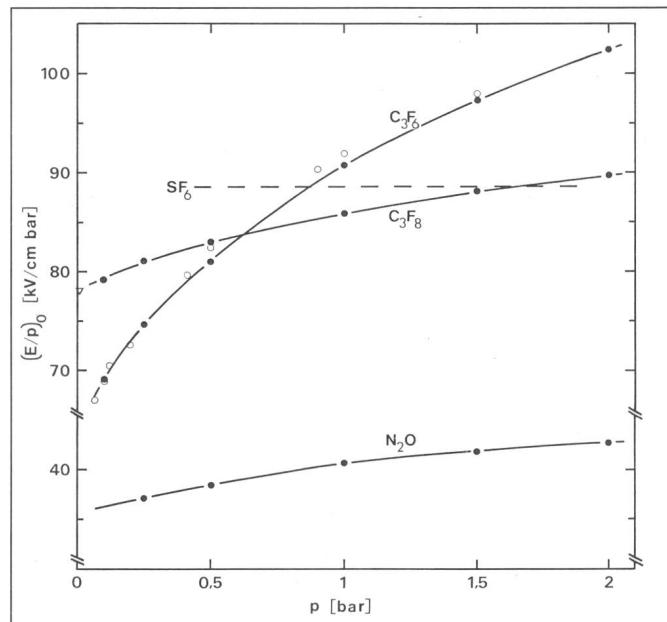


Fig. 6 Inhärente elektrische Festigkeit $(E/p)_0$ von C₃F₆, C₃F₈ und N₂O im Vergleich mit dem druckunabhängigen Wert von SF₆

- Diese Arbeit; $p = 0,1-2$ bar/20 °C
- Aschwanden [13]; $p = 0,06-1,5$ bar; «Swarm»-Experiment
- ▽ Naidu und Prasad [16]; $p = 0,002$ bar; «Swarm»-Experiment

Dichte (Kompressibilität $Z(p)$) im Rahmen dieser Arbeit, soweit keine Daten verfügbar waren, jeweils gemessen und in der Auswertung gegebenenfalls berücksichtigt (Größenordnung: bei 2 bar typisch 2 bis 6% Abweichungen vom idealen Gasverhalten).

Bei der Überprüfung der Paschen-Regel stellte sich heraus, dass drei der untersuchten Gase, nämlich C_3F_6 , C_3F_8 und N_2O markante Abweichungen aufweisen [13; 14; 15], indem ihre Festigkeiten bei konstanten pd mit dem Druck stark zunehmen. In Figur 5 ist dieses Verhalten am Beispiel von C_3F_6 in der Darstellung der auf den Druck bezogenen Durchschlagfeldstärke in Funktion von pd gezeigt. Während zum Beispiel in SF_6 dieser Zusammenhang durch eine einheitliche Kurve beschrieben wird, tritt bei C_3F_6 der Druck als Parameter auf, und die Krümmung der Kurven ändert sich mit dem Druck.

Aus solchen Messreihen wurden dann die inhärenten Festigkeiten $(E/p)_0$ der drei Gase in Funktion des Druckes abgeleitet. Sie sind in Figur 6 im Vergleich mit SF_6 dargestellt. Dieser Festigkeit wird durch C_3F_6 bei etwa 0,8 bar und durch C_3F_8 bei etwa 1,6 bar erreicht. Die stärkste Festigkeitszunahme weist C_3F_6 auf; sie beträgt etwa 50% im Bereich bis 2 bar. Ferner sind in Figur 6 zum Vergleich die Werte von $(E/p)_0$ dieses Gases eingezeichnet, welche von Aschwanden [13] in einem «Swarm»-Experiment ermittelt wurden. Die Übereinstimmung der beiden Datenserien liegt in der Größenordnung der Messgenauigkeit.

Als Ergänzung ist in Figur 7 noch gezeigt, wie sich dieses spezielle Verhalten prinzipiell in der Darstellung Druck gegen Durchschlagsspannung äussert. Die Skizze geht von einer beliebigen, aber nicht allzu inhomogenen Elektrodenanordnung mit konstanter Schlagweite aus.

Im Gegensatz zu den genannten Komponenten wurden in allen übri-

Zusammenstellung der hauptsächlichen Daten der untersuchten Gase
Bezugsdruck 1 bar

Tabelle I

Gas	$(E/p)_0 / [(E/p)_0]_{SF_6}$	$(p \cdot h)_{krit}$ [bar · μm]	Dampfdruck bei 20 °C [bar]
$C_2Cl_2F_4$	1,71	30	1,8
$CBrClF_2$	1,52	50	2,3
C_2ClF_5	1,17	70	8,0
CCl_2F_2	1,04	100	5,5
C_3F_6	1,03	130	6,5
SF_6	1	60	21,5
C_3F_8	0,97	70	7,7
C_2F_6	0,78	90	~30
$CBrF_3$	0,74	260	14
$CClF_3$	0,53	430	32
N_2O	0,46	350	50
CF_4	0,40	260	

gen untersuchten Gasen keine derartigen Abweichungen von der Paschen-Regel gefunden, das heisst also, dass dort die Zunahme von $(E/p)_0$ mit dem Druck in dem Bereich liegt, wo sie alleine durch die Kompressibilitäten $Z(p)$ der betreffenden Gase erklärbar ist. In Tabelle I sind die wichtigsten Daten der Gase zusammengestellt; diese sind nach ihren Festigkeiten geordnet. Die Werte beziehen sich dabei auf einen Druck von 1 bar. In der ersten Kolonne der Tabelle sind die relativen, auf SF_6 bezogenen inhärenten Festigkeiten angegeben, wobei für SF_6 ein Wert von 88,56 kV/cm bei 1 bar ermittelt wurde. Ferner sind das kritische Produkt von Druck und Störstellenhöhe (Gl. 7) und die entsprechenden Dampfdrücke aufgelistet.

Zum Schluss dieses Abschnitts noch einige Bemerkungen zur Messwertstreuung und zu den beobachteten Gaszersetzungen: Obwohl von Gas zu Gas etwas verschieden, betrug die Differenz zwischen dem höchsten und dem tiefsten Wert eines Messpunkts, abgesehen von einigen Ausnahmen, stets weniger als 0,5% vom Mittelwert. Diese Größenordnung mag zunächst erstaunen, doch ist von den Durchschlagvorgängen her gesehen nicht zu erwarten, dass diesbezüglich grössere Streuungen auftreten. Solche wären vielmehr als Unzulänglichkeiten der Messapparatur zu werten; zu wenig Anfangselektronen aufgrund einer ungenügenden Bestrahlung der Elektroden; eine instabile Prüfspannung oder eine zu hohe Spannungssteigerungsgeschwindigkeit (diese betrug hier 20 ... 50 V/s); im Prüfgefäß frei bewegliche Partikel oder eine zu grosse Durchschlagenergie, die zur Elektrodenerosion führt; usw. Abgesehen von solchen äusseren Einflüssen kann aber auch eine Gasersetzung die Ursache

von Streuungen sein, ein Effekt, der besonders bei CCl_2F_2 und $CBrF_3$ zu beobachten ist.

Entgegen anfänglichen Befürchtungen hatten hingegen die bei mehreren Gasen auftretenden Kohlenstoffablagerungen bei diesen Drücken noch keinen Einfluss auf die Durchschlagsspannungen. Ablagerungen in Form eines feinen gräulichen Schleiers auf den Elektroden bildeten sich in C_3F_6 , CCl_2F_2 und in $C_2Cl_2F_4$.

Als Ergänzung wurden auch einige Durchschläge ohne Abschneidefunkenstrecke, also mit stark erhöhter Energie durchgeführt. Erwartungsgemäss traten dann die Ablagerungen in deckend schwarzen Schichten auf und verursachten eine starke Festigkeitsverminderung, verbunden mit einer grossen Streuung. Ferner wurde in einem Experiment bei 5 bar festgestellt, dass $CBrF_3$ unter Lichtbogeneinwirkung grosse Mengen von Brom abscheidet und die günstige Festigkeit dabei verliert. Ein ähnliches Verhalten dürfte auch bei $CBrClF_2$ zu erwarten sein.

6. Ergänzende Untersuchungen¹⁾

Aufgrund der vorstehenden Resultate ist es zweifellos die Komponente C_3F_6 , welche zunächst das Hauptinteresse auf weitere Abklärungen auf sich zieht. So zeigt dieses Gas wegen der besonderen Druckabhängigkeit bereits bei 2 bar eine um gut 15% höhere Festigkeit als SF_6 , und mit einer weiteren Festigkeitszunahme oberhalb dieses Drucks ist zu rechnen. Dieser günstigen Eigenschaft steht aber das Pro-

¹⁾ Diese Untersuchungen wurden von den Herren cand. El. Ing. C. Ammann und E. Engler durchgeführt.

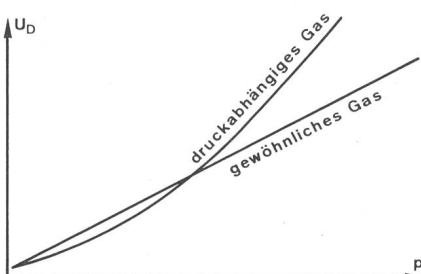


Fig. 7 Durchschlagsspannung U_D eines druckabhängigen und eines üblichen Gases in Abhängigkeit vom Druck in einer Elektrodenanordnung mit konstanter Schlagweite

blem der Gasersetzung gegenüber. Hierzu liegen Untersuchungen vor [7; 17], welche zeigen, dass sich vor allem SF₆ als Zumischgas zu C₃F₆ zur Unterdrückung der Bildung freien Kohlenstoffs eignet. Gerade das so entstehende Gemisch ist aber auch von der dielektrischen Seite her gesehen besonders vorteilhaft: Es zeigt einen der ausgeprägtesten bisher gefundenen Synergie-Effekte; die resultierende Festigkeit des Gemisches ist höher als die prozentuale Addition der Festigkeiten der einzelnen Komponenten [18].

Natürlich haben diese, soweit bekannt, sehr günstigen Eigenschaften von SF₆/C₃F₆ dazu geführt, dass dem Gemisch zurzeit grössere Chancen für eine praktische Anwendung beigegeben werden. Die Erkenntnisse beruhen aber alle auf Untersuchungen bei verhältnismässig niedrigen Drücken ($\leq 1,5$ bar) und sehr kleinen Schlagweiten. Um den Messbereich zu hohen $p\bar{d}$ -Werten erweitern zu können, ist eine zweite Versuchsanlage mit einem Prüfgefäß für 6 bar und 800 kV aufgebaut worden. Die prinzipielle Beschaltung entspricht den Ausführungen von Abschnitt 3, und es wurden auch dieselben Elektroden verwendet. Sie sind hier innerhalb des Prüfgefäßes in ein zweites, nur etwa 8 l grosses Gefäß aus Isoliermaterial eingebaut, um bei höheren Drücken der stark zunehmenden Empfindlichkeit der Gase gegenüber freien Partikeln Rechnung zu tragen. Auf diese Weise lässt sich das Elektrodensystem in einer staubfreien Atmosphäre zusammenbauen.

Figur 8 zeigt die ersten Resultate der Untersuchungen des Gemisches SF₆/C₃F₆ in der Darstellung der auf den Druck bezogenen Durchschlagfeldstärke in Funktion des Mischungsverhältnisses, mit dem Totaldruck als Parameter. Die Messungen führten zu folgenden wichtigsten Ergebnissen²⁾:

- Der von Christophorou [18] bei 0,667 bar festgestellte Synergismus dieses Gemisches ist bei höheren Drücken nur noch wenig ausgeprägt; das Zwischenmaximum der Festigkeit verschwindet (vgl. Fig. 8).

- Bei 3 bar und darüber sowie bei erhöhter Durchschlagenergie tritt im reinen C₃F₆ eine starke Gasersetzung auf. Es werden flockenartige, bis 15 mm lange Graphitteilchen gebildet. Mit zunehmender SF₆-Beimi-

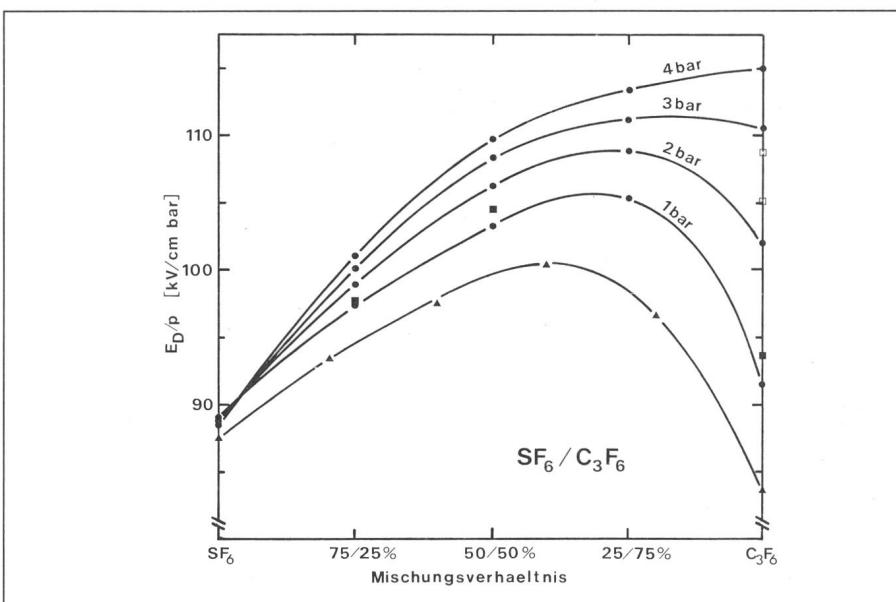


Fig. 8 Auf den Druck bezogene Durchschlagfeldstärken E_D/p des Gemisches SF₆/C₃F₆ in Abhängigkeit des Mischungsverhältnisses bei verschiedenen Totaldrücken (alle Werte beziehen sich auf 20 °C)

- Diese Arbeit: $p = 1-4$ bar/20 °C; $d = 1$ cm
- ▲ Christophorou [18]: $p = 0,667$ bar/22 °C; $d = 0,826$ cm
- Wootton [17]: $p = 1,5$ bar; $d = 0,5$ cm
- Chen [15]: $p = 3$ bar, 5 bar/23 °C; $d = 0,254$ cm

schung nimmt die Menge der sichtbaren Zersetzungspunkte ab. Bei kleineren C₃F₆-Anteilen kann sich nach einigen Durchschlägen eine isolierende Beschichtung der Elektroden bilden, welche die Durchschlagfeldstärke der Anordnung einige Prozente über die elektrische Festigkeit des Gemisches ansteigen lässt.

- Die Empfindlichkeit gegenüber lokalen Feldstörungen scheint oberhalb 2 bar in C₃F₆ und SF₆/C₃F₆ noch grösser zu sein als in reinem SF₆ (vgl. dazu die trotz sehr kleiner Elektrodenanordnung bei 3 und 5 bar bereits stark abgesenkten Messwerte von Chen et al., 1982; Figur 8). Oberhalb 4 bar ist es bis jetzt noch nicht gelungen, die unter idealen Homogenfeldbedingungen zu erwartenden, noch unbekannten Durchschlagfeldstärken zu erreichen.

7. Schlussfolgerungen

Grundsätzlich kann man aus Figur 1 und Tabelle I ersehen, dass mit zunehmender Festigkeit der Gase im allgemeinen auch ihre Dampfdrücke stark abnehmen und dass SF₆ in diesem Zusammenhang eine ausserordentlich günstige Ausnahme bildet. Diese Erkenntnis ist zwar nicht neu,

aber es besteht immer noch die Hoffnung, dass eine etwas geringere Festigkeit unter anderem mit einer verminderten Rauhigkeitsempfindlichkeit kompensiert werden könnte. Doch aufgrund der gemessenen Werte von $(ph)_{krit}$ sind auch diesbezüglich von keinem der interessanteren Gase signifikante Vorteile zu erwarten.

Das heisst nicht unbedingt, dass keines dieser Gase die Vorteile des SF₆ überbieten könnte, denn das günstige Verhältnis von Dampfdruck zu Festigkeit kommt ja nur dann voll zur Geltung, wenn man von den heute üblichen Spezifikationen für gekapselte Hochspannungsanlagen ausgeht. In diesem Sinne kann es auch nicht das Ziel sein, das SF₆ gänzlich zu ersetzen, sondern vielmehr Alternativen für anders gelagerte Anwendungen zu bieten. Man denke dabei an Einsatzgebiete wie zum Beispiel Innenraumanlagen, Transformatoren, blechgekapselte Mittelspannungsanlagen, Anlagen bei extrem tiefen Außentemperaturen usw.

Abgesehen davon sollten diese Gase auch eher als mögliche Komponenten eines Gemisches beurteilt werden, und dabei ist C₃F₆, C₃F₈, C₂ClF₅, C₂Cl₂F₄ und C₂F₆ zusammen mit beispielsweise SF₆ oder N₂ durchaus von Interesse. Ausserdem scheinen sich auch einige nicht vollständig halogenisierte Kohlenwasserstoffe als Zumischgase speziell zu eignen [18]. Hingegen kann

²⁾ Eine ausführliche Publikation ist für das Int. Symposium Hochspannungstechnik 1983, Athen, geplant.

N_2O , die dritte druckabhängige Komponente, nicht zusammen mit CF -Verbindungen eingesetzt werden, weil damit explosive Gemische entstehen. Im weiteren könnte die chemisch sehr stabile Komponente C_2F_6 auch für Einsätze bei sehr tiefen Temperaturen in Betracht gezogen werden. Besondere Bedeutung wird zurzeit, wie erwähnt, dem Gemisch $\text{C}_3\text{F}_6/\text{SF}_6$ beigemessen. Die Untersuchungen haben aber gezeigt, dass oberhalb etwa 2 bar die Zutreffung von C_3F_6 zu SF_6 das Erreichen hoher Feldstärken zunehmend erschwert und dass der Synergieeffekt mit steigendem Druck stark abnimmt. Die nennenswerten Vorteile dieses Gemisches liegen folglich im Druckbereich von 1 bis 2 bar und C_3F_6 -Anteilen von 25 bis 50%. Der Taupunkt einer 50/50%-Mischung beträgt -40 °C bei 1 bar bzw. -25 °C bei 2 bar.

Literatur

- [1] *B. Gänger*: Alternativgase für SF_6 . Bull. SEV/VSE 73(1982)5, S. 209...214.
- [2] *J. C. Devins*: Replacement gases for SF_6 . IEEE Trans. IE 15(1980)2, p. 81...86.
- [3] *L. G. Christophorou*: High voltage research (breakdown strength of gaseous and liquid insulators) and environmental effects of dielectric gases. Semiannual report ORNL/TM-6113, April...September 1977. Oak Ridge/Tennessee, Oak Ridge National Laboratory, 1977.
- [4] *R. E. Wootton, S. J. Dale* and *N. J. Zimmermann*: Electric strength of some gases and mixtures. Gaseous dielectrics. Proceedings of the second international symposium 1980. New York a.o., Pergamon Press, 1980; p. 137...148.
- [5] *E. Gockenbach*: Untersuchungen an neuen Isolier- und Kühlmitteln für gekapselte Stromrichterventile der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung. Dissertation der Technischen Hochschule Darmstadt, 1977.
- [6] *R. E. Wootton* a.o.: Prediction of electrical breakdown carbonisation of gases and gas mixtures. Gaseous dielectrics. Proceedings of the second international symposium 1980. New York a.o., Pergamon Press, 1980; p. 294...302.
- [7] *I. Sauers, T. J. Haevens* and *L. G. Christophorou*: Carbon inhibition in sparked perfluorocarbon- SF_6 mixtures. Journal of Physics D: Applied Physics 13(1980)-, p. 1283...1290.
- [8] *R. G. Baumgartner*: Dielectric characteristics of mixtures of sulfurhexafluoride (SF_6) and nitrogen (N_2). Third international conference on gas discharges, London, 1974. IEE Conference Publication 118, p. 366...369.
- [9] *R. G. Baumgartner*: Untersuchungen über die Gültigkeit des Ähnlichkeitsgesetzes in Schwefelhexafluorid. Dissertation Nr. 5997 der ETH Zürich, 1977.
- [10] *W. Zaengl* und *R. G. Baumgartner*: Zur Ursache der Abweichungen vom Paschen-Gesetz in SF_6 . ETZ-A 96(1975)11, S. 510...514.
- [11] *A. Pedersen*: Estimation of breakdown voltages in compressed, strongly electronegative gases and gas mixtures. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Annual Report 1977, p. 373...378.
- [12] *I. C. Sommerville, D. J. Tedford* and *B. H. Crichton*: Electrode roughness and compressed SF_6 . A generalised approach. Proceedings of the 13th International Conference on Phenomena in Ionized Gases, Berlin 1977; p. 373...379.
- [13] *T. Aschwanden* and *G. Biasiutti*: Dielectric strength of hexafluoropropylene. Journal of Physics D: Applied Physics 14(1981)-, p. 189...192.
- [14] *G. Biasiutti*: Homogeneous field breakdown strength characteristics of some dielectric gases. Gaseous Dielectrics. Proceedings of the third international symposium 1982. New York a.o., Pergamon Press, 1982; p. 174...182.
- [15] *C. L. Chen, R. E. Wootton* and *P. J. Chantry*: Measured attachment and ionization cross sections and dielectric strength of CF_3SF_5 and C_3F_6 . Seventh international Conference on gas discharge and their applications, August 31...September 3 1982, London.
- [16] *M. S. Naidu* and *A. N. Prasad*: Mobility diffusion and attachment of electrons in perfluoroalkanes. Journal of Physics D: Applied Physics 5(1972)5, p. 983...993.
- [17] *R. E. Wootton, S. J. Dale* and *N. J. Zimmermann*: Electric strength of some gases and mixtures. Gaseous dielectrics. Proceedings of the second international symposium 1980. New York a.o., Pergamon Press, 1980; p. 137...148.
- [18] *L. G. Christophorou*: High voltage research (breakdown strength of gaseous and liquid insulators) and environmental effects of dielectric gases. Semiannual report ORNL/TM-7173, April...September 1979. Oak Ridge/Tennessee, Oak Ridge National Laboratory, 1979.