

**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 Isoliergase 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>**



rung der Isolierfähigkeit wäre theoretisch natürlich auch bei SF<sub>6</sub> durch Erhöhung des Gasdrucks möglich; dagegen stehen aber einerseits eine entsprechende Erhöhung der Verflüssigungstemperatur und andererseits erfahrungsgemäss auch eine bedeutende Zunahme der Empfindlichkeit gegenüber Schmutzpartikel und Elektrodenrauigkeiten. Aus dieser Sicht erscheint es somit aussichtsreicher, nach einem neuen Gas zu suchen, das das SF<sub>6</sub> 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 SF<sub>6</sub> das weitaus günstigste Verhältnis von Verflüssigungstemperatur zu elektrischer Festigkeit aufweist. Diesen Umstand kann man leicht aus Figur 1 ersehen. Sie zeigt die auf SF<sub>6</sub> 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 Durchschlagspannung 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 SF<sub>6</sub> liegen, bei gleichem Druck eine höhere Durchschlagfestigkeit als SF<sub>6</sub>. Ferner ermöglicht die Darstellung einen groben Vergleich der Gase mit einer SF<sub>6</sub>-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 SF<sub>6</sub> 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 SF<sub>6</sub> 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 Isoliergas sich im Bereich rechts unten befinden müsste, denn dort liesse sich mit geringerem Fülldruck eine höhere Festigkeit erzielen als mit SF<sub>6</sub> unter den genannten Einsatzbedingungen. Das einzige bis jetzt bekannte Gas, das diese Bedingung erfüllt, ist die äusserst giftige Verbindung CF<sub>3</sub>CN.

Für den Praktiker bedeutet dies also, dass sich in nächster Zukunft wohl noch kaum eine wirtschaftliche Alternative für SF<sub>6</sub> 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 Isoliergase 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, Elektrodenrauigkeiten und freie Partikel, Lichtbögen usw. Ausserdem scheint es aus Gründen der durchschlagsbedingten Gaszersetzung [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 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 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 Durchschlagmessungen 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 Durchschlagspannungen 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 Durchschlagspannung 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 electronegativen 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  $\beta$  die Steigung der sog. Ionisationskennlinie, wobei diese zwei Werte bei den meisten bekannten Gasen druckunabhängige 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 Durchschlagspannung 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  $K/\beta$  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 Durchschlagspannung in Abhängigkeit von  $pd$  wird also durch eine Gerade charakterisiert, die eine Steigung von  $(E/p)_0$  aufweist und beim Wert  $K/\beta$  einen Schnittpunkt mit der  $U_D$ -Achse besitzt. Die Grösse von  $K/\beta$  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 Durchschlagspannungen 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  $K/\beta$  äussert sich hier in einer charakteristischen Krümmung der Kurve zu hohen Feldstärken bei kleinen  $pd$ . Bei grösse-

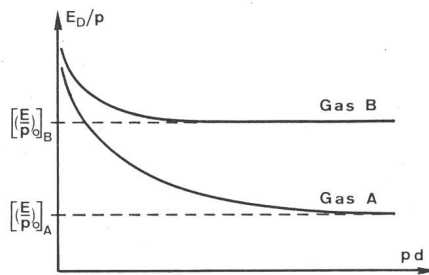


Fig. 2 Auf den Druck bezogene Durchschlagfeldstärke  $E_D/p$  in Funktion des Produkts von Druck und Schlagweite  $pd$  zweier beliebiger Gase

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 Elektrodenrauigkeiten und Staubeilchen reagieren und andererseits grössere Abstände recht grosse Elektroden bedingen würden.  $(E/p)_0$  wird deshalb vorteilhaft durch Anpassung von Gl. 4 an eine Serie von Durchschlagmessungen 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  $K/\beta$ . (Die Werte  $K$  und  $\beta$  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 Dimensionierungsfeldstärke 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

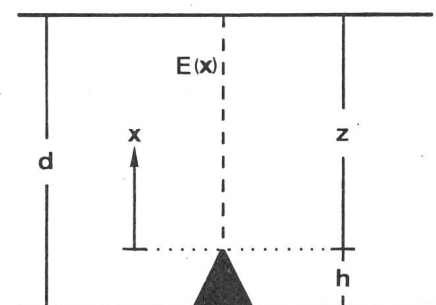


Fig. 3 Homogenes Plattenfeld mit lokaler Feldstörung

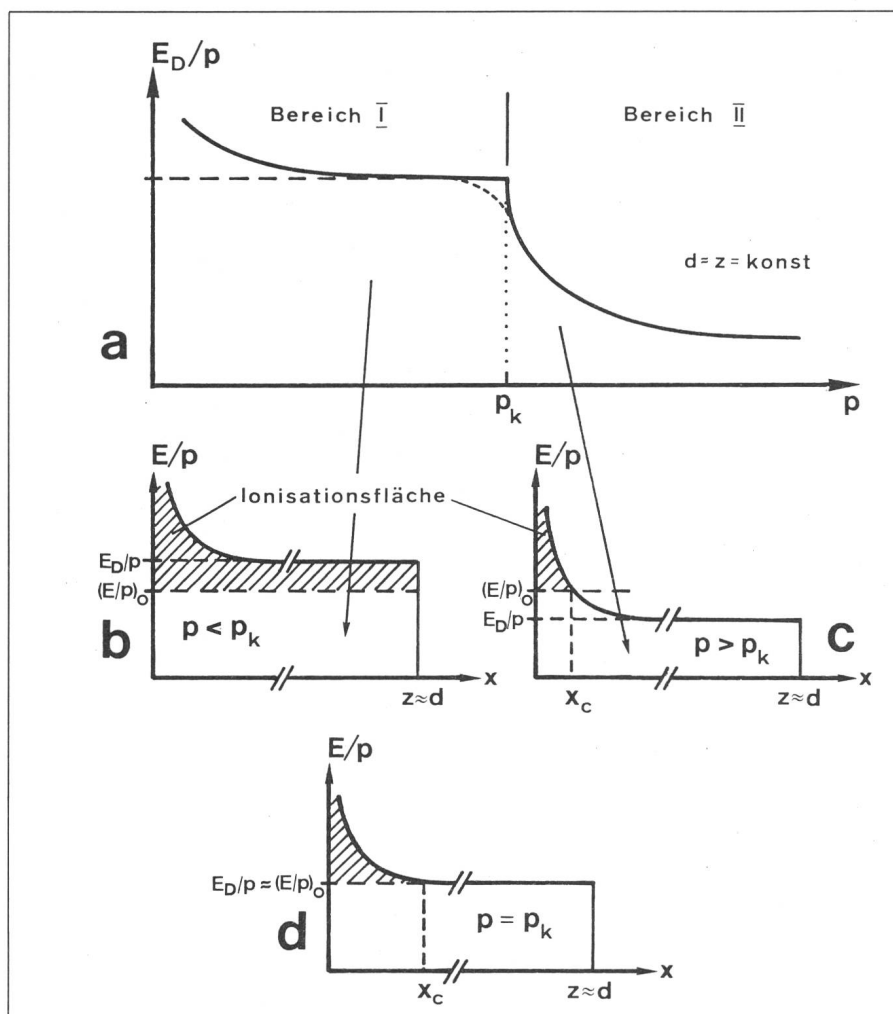


Fig. 4 Durchschlagfeldstärke  $E_D/p$  in Funktion des Drucks einer Homogenfeldanordnung mit fester lokaler Feldstörung (gemäss Fig. 3) (a). Verlauf der auf den Gasdruck bezogenen Feldstärke und Ausbreitung der Ionisationsfläche entlang der Linie höchster Feldstärke dieser Anordnung, unter und über dem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

Für relativ kleine Drücke wird die rechte Seite von Gl. 6 gross und somit wird auch die durch die linke Seite beschriebene Fläche, die Zone der Ladungsträgervermehrung oder «Ionisationsfläche» gross (Fig. 4b). Folglich wird sich  $x_c$  über die gesamte Schlagweite  $0 \leq x \leq z$  erstrecken. Die nur in einem sehr kleinen  $x$ -Bereich vorhandene Feldüberhöhung bleibt aber für die Durchschlagspannung  $U_D$  ohne Bedeutung, weil sie bei diesen niedrigen Drücken nur einen sehr kleinen Bruchteil der Ionisationsfläche bildet. Der Anstieg von  $E_D/p$  bei kleinen Gasdrücken bzw. kleinen  $pd$ -Werten wird somit aus Gl. 6 direkt sichtbar (vgl. auch Gl. 4).

Steigt der Gasdruck, so verschwindet die Zone der Ladungsträgervermehrung im Homogenfeld-Bereich recht plötzlich (Fig. 4c) und zieht sich auf das Gebiet der Feldstörung zurück. Dabei wird zunächst  $E_D/p = (E/p)_0$

(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. coaxialen 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  $K/\beta$  ermittelt werden.



### 3. Versuchsaufbau

Als Prüfgefäß diente ein Glaszylinder 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 Parallelfunktenstrecke 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 SF<sub>6</sub> 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 Rauigkeiten 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.

### 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 CF<sub>4</sub>, CClF<sub>3</sub>, CBrF<sub>3</sub>, CC1<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, CBrClF<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>ClF<sub>5</sub>, C<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>F<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>, C<sub>3</sub>F<sub>6</sub>, N<sub>2</sub>O und SF<sub>6</sub> zur Verfügung. Ausser N<sub>2</sub>O und SF<sub>6</sub> gehören alle Gase zu einer Gruppe von Halogen-Kohlenstoff-Verbindungen, in der sich jeweils benachbarte Komponenten nur durch ein Atom oder durch die nächst-

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.

### 5. Messungen

Entsprechend dem beschriebenen Vorgehen zur Ermittlung von  $(E/p)_0$  und  $K/\beta$  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 Durchschlagspannung 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

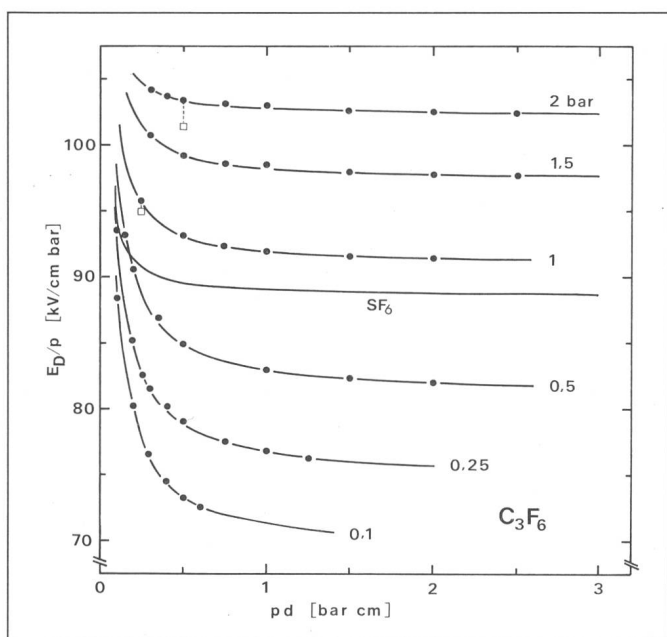


Fig. 5 Auf den Druck bezogene Durchschlagfeldstärken in Funktion des Produkts von Druck und Schlagweite  $pd$  in SF<sub>6</sub> und C<sub>3</sub>F<sub>6</sub> bei verschiedenen Drücken (bezogen auf 20 °C)

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)

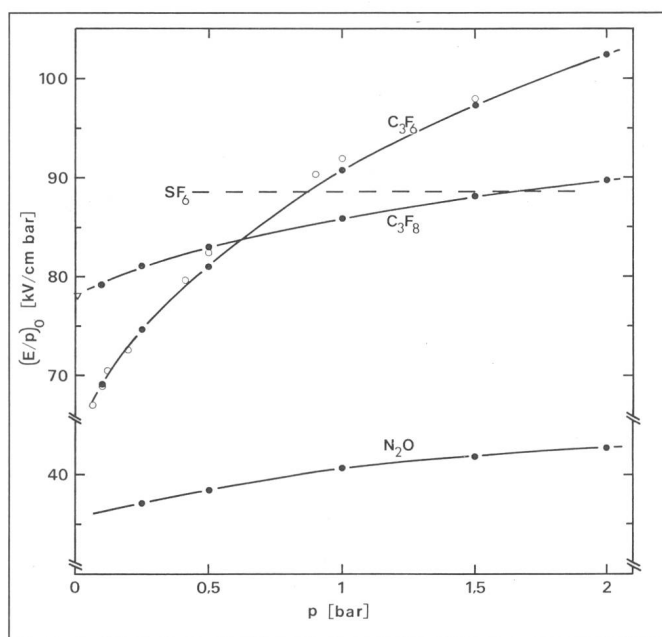


Fig. 6 Inhärente elektrische Festigkeit  $(E/p)_0$  von C<sub>3</sub>F<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>F<sub>8</sub> und N<sub>2</sub>O im Vergleich mit dem druckunabhängigen Wert von SF<sub>6</sub>

● 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. Dessen 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 eingetragen, 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 Durchschlagspannung 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 übrigen

Zusammenstellung der hauptsächlichsten 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 Gaszersetzung 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 Durchschlagspannungen. 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 Abschnidefunkenstrecke, 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 Untersuchungen<sup>1)</sup>

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-

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

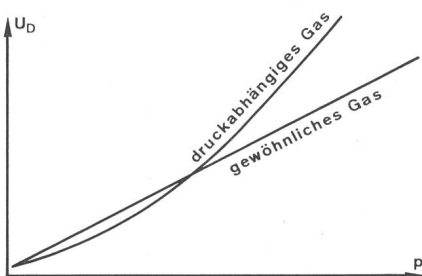


Fig. 7 Durchschlagspannung  $U_D$  eines druckabhängigen und eines üblichen Gases in Abhängigkeit vom Druck in einer Elektrodenanordnung mit konstanter Schlagweite

blem der Gaszersetzung gegenüber. Hierzu liegen Untersuchungen vor [7; 17], welche zeigen, dass sich vor allem  $\text{SF}_6$  als Zumischgas zu  $\text{C}_3\text{F}_6$  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  $\text{SF}_6/\text{C}_3\text{F}_6$  dazu geführt, dass dem Gemisch zurzeit grössere Chancen für eine praktische Anwendung beigemessen 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  $pd$ -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 Elektroden-system in einer staubfreien Atmosphäre zusammenbauen.

Figur 8 zeigt die ersten Resultate der Untersuchungen des Gemisches  $\text{SF}_6/\text{C}_3\text{F}_6$  in der Darstellung der auf den Druck bezogenen Durchschlagfeldstärke in Funktion des Mischungsverhältnisses, mit dem Totaldruck als Parameter. Die Messungen führten zu folgenden wichtigsten Ergebnissen<sup>2)</sup>:

- 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  $\text{C}_3\text{F}_6$  eine starke Gaszersetzung auf. Es werden flockenartige, bis 15 mm lange Graphitteilchen gebildet. Mit zunehmender  $\text{SF}_6$ -Beimi-

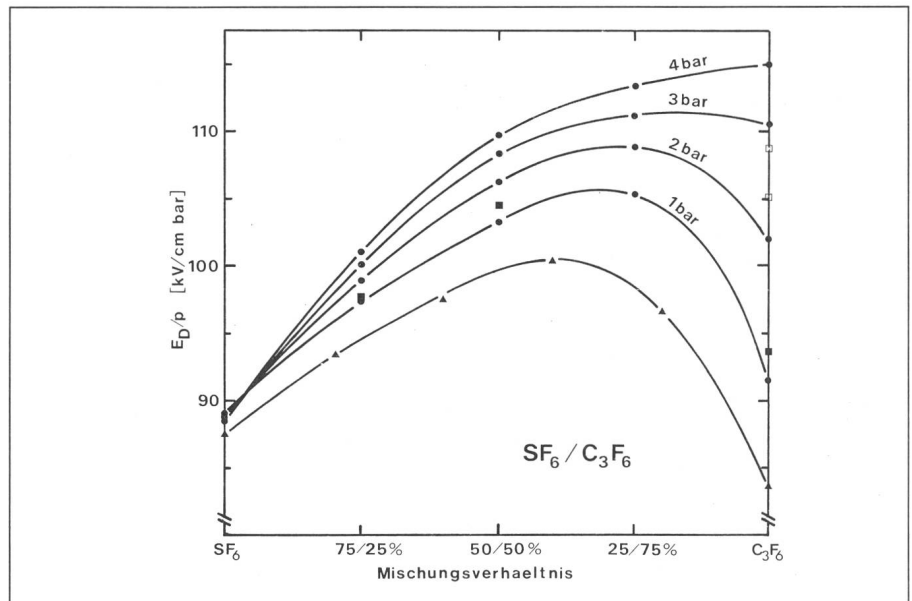


Fig. 8 Auf den Druck bezogene Durchschlagfeldstärken  $E_D/p$  des Gemisches  $\text{SF}_6/\text{C}_3\text{F}_6$  in Abhängigkeit des Mischungsverhältnisses bei verschiedenen Totaldrücken (alle Werte beziehen sich auf 20 °C)

- 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 Zersetzungsprodukte ab. Bei kleineren  $\text{C}_3\text{F}_6$ -Anteilen kann sich nach einigen Durchschlägen eine isolierende Beschichtung der Elektroden bilden, welche die Durchschlagfeldstärke der Anordnung einige Prozente über die elektrische Festigkeit des Gemischs ansteigen lässt.

- Die Empfindlichkeit gegenüber lokalen Feldstörungen scheint oberhalb 2 bar in  $\text{C}_3\text{F}_6$  und  $\text{SF}_6/\text{C}_3\text{F}_6$  noch grösser zu sein als in reinem  $\text{SF}_6$  (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  $\text{SF}_6$  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 Rauigkeitsempfindlichkeit kompensiert werden könnte. Doch aufgrund der gemessenen Werte von  $(ph)_{\text{krit}}$  sind auch diesbezüglich von keinem der interessanteren Gase signifikante Vorteile zu erwarten.

Das heisst nicht unbedingt, dass keines dieser Gase die Vorteile des  $\text{SF}_6$  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  $\text{SF}_6$  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  $\text{C}_3\text{F}_6$ ,  $\text{C}_3\text{F}_8$ ,  $\text{C}_2\text{ClF}_5$ ,  $\text{C}_2\text{Cl}_2\text{F}_4$  und  $\text{C}_2\text{F}_6$  zusammen mit beispielsweise  $\text{SF}_6$  oder  $\text{N}_2$  durchaus von Interesse. Ausserdem scheinen sich auch einige nicht vollständig halogenisierte Kohlenwasserstoffe als Zumischgase speziell zu eignen [18]. Hingegen kann

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



$\text{N}_2\text{O}$ , die dritte druckabhängige Komponente, nicht zusammen mit CF-Verbindungen eingesetzt werden, weil damit explosive Gemische entstehen. Im weiteren könnte die chemisch sehr stabile Komponente  $\text{C}_2\text{F}_6$  auch für Einsätze bei sehr tiefen Temperaturen in Betracht gezogen werden. Besondere Bedeutung wird zurzeit, wie erwähnt, dem Gemisch  $\text{C}_3\text{F}_8/\text{SF}_6$  beigemessen. Die Untersuchungen haben aber gezeigt, dass oberhalb etwa 2 bar die Zumischung von  $\text{C}_3\text{F}_8$  zu  $\text{SF}_6$  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  $\text{C}_3\text{F}_8$ -Anteilen von 25 bis 50%. Der Taupunkt einer 50/50%-Mischung beträgt  $-40^\circ\text{C}$  bei 1 bar bzw.  $-25^\circ\text{C}$  bei 2 bar.

## Literatur

- [1] B. Gänger: Alternativgase für  $\text{SF}_6$ . Bull. SEV/VSE 73(1982)5, S. 209...214.
- [2] J. C. Devins: Replacement gases for  $\text{SF}_6$ . 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, 1979.
- [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- $\text{SF}_6$  mixtures. Journal of Physics D: Applied Physics 13(1980)-, p. 1283...1290.
- [8] R. G. Baumgartner: Dielectric characteristics of mixtures of sulfurhexafluoride ( $\text{SF}_6$ ) and nitrogen ( $\text{N}_2$ ). 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  $\text{SF}_6$ . 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  $\text{SF}_6$ . 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  $\text{CF}_3\text{SF}_3$  and  $\text{C}_3\text{F}_8$ . 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.