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: 69 (1978)

Heft: 22: Sondernummer Elektrotechnik 1978 = Edition spéciale Electrotechnique 1978

Artikel: Die Anwendung von SF6 im Anlagen- und Schalterbau

Autor: Eidinger, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-914954

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.12.2025

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

Die Anwendung von SF_6 im Anlagen- und Schalterbau

Von A. Eidinger

621.315.618:621.316.54/57;

Die ausgezeichneten Isolier- und Löscheigenschaften von SF_6 führten in den vergangenen Jahren zu einem eigentlichen Umbruch in der Schaltgeräte- und Schaltanlagentechnik. Bei den Leistungsschaltern können mit SF_6 im Vergleich zu anderen Löschmedien bei kleineren Betriebsdrücken grössere Ausschaltleistungen erreicht werden. Dadurch sind besonders einfache, betriebssichere und wirtschaftliche Schaltgeräte möglich geworden. Die guten dielektrischen Eigenschaften von SF_6 ermöglichen den Bau von sehr kompakten, platzsparenden gekapselten Anlagen, die weitgehend unabhängig von störenden Umwelteinflüssen wie Verschmutzung, Witterung usw. sind. Der Umgang mit SF_6 wird abschliessend diskutiert.

Les excellentes propriétés d'isolement et d'extinction du SF_6 ont conduit, ces dernières années, à un net changement dans la technique des appareils et installations de couplage. Dans les disjoncteurs, l'emploi du SF_6 permet d'atteindre des pouvoirs de coupure plus grands qu'avec d'autres moyens d'extinction des arcs et à des pressions de service plus faibles, ce qui donne des appareils de couplage particulièrement simples, fiables et économiques. Les bonnes propriétés diélectriques du SF_6 permettent la construction d'installations blindées très compactes, qui prennent moins de place et sont bien à l'abri de l'encrassement, des intempéries, etc. Pour terminer, l'auteur discute de la manipulation du SF_6.

1. Einleitung

In den letzten zwei Jahrzehnten haben sich im Anlagen- und Schalterbau wesentliche Änderungen vollzogen. Diese stürmische Entwicklung war einerseits bedingt durch die Einführung höherer Spannungsniveaus und die Notwendigkeit, grössere Kurzschlußströme zu beherrschen, anderseits und vor allem aber dadurch, dass in den letzten Jahren zusätzlich SF_6 als Isolier- und Löschmedium ein breites Anwendungsfeld gefunden hat. Die Gründe, die zu diesem wesentlichen Umbruch führten, sollen im folgenden näher dargelegt werden.

Grundsätzlich stehen für die Isolationsaufgaben feste, flüssige und gasförmige Isolierstoffe zur Verfügung.

Feste Isolierstoffe werden für hohe oder höchste Nennspannungen nur als Stützkörper in gasförmigen Isoliermedien verwendet. Eine ausschliessliche Feststoffisolation (z.B. Epoxydharze mit mineralischen Füllstoffen) kommt nicht in Frage, einmal weil bei den erforderlichen grossen Wandstärken innere Spannungen (Risse) und Lunker nicht zu vermeiden sind, vor allem aber weil bei den heute üblichen hohen Nennströmen ($\geqq$ 2000 A) die Wärmeabfuhr nur mit sehr hohem, zusätzlichem Aufwand gewährleistet werden kann. So liegt beispielsweise bei Hochspannungskabeln – sofern nicht eine zusätzliche forcierte Kühlung angewendet wird – die erreichbare Grenzstromstärke bei etwa 1000 A.

Der Einsatz flüssiger Isoliermittel im Schaltanlagenbau wurde zwar schon sehr früh und wiederholt versucht, führte aber zu keinem durchschlagenden Erfolg. Flüssigkeiten sind nicht kompressibel, so dass gasgefüllte Puffervolumina vorgesehen und bei Lichtbogenfehlern sehr hohe Drücke in Kauf genommen werden müssen. Vor allem aber wurde bisher kein voll befriedigendes flüssiges Isoliermittel gefunden. Isolieröl, wie es in Transformatoren und Wandlern verwendet wird, stellt wegen der benötigten grossen Volumina eine erhebliche Brand- und Umweltgefährdung dar. Das unbrennbare Clophen ist teuer und kann bei der Handhabung zu gesundheitsschädlichen Auswirkungen (Salzsäuredämpfe) führen.

Gasförmige Isolierstoffe hingegen weisen generell eine Reihe von Vorteilen auf: Sie bilden einen homogenen Isolator, sind im allgemeinen sauber, leicht zu handhaben, unbrennbar und thermisch hoch belastbar; Wärmeenergie (z.B. Dauerstromerwärmung oder Lichtbogenenergie) wird vom kompressiblen Gas problemlos aufgenommen. Luft ist bei weitem nicht das beste gasförmige Isoliermittel. Bei atmosphärischer Luft wird die dielektrische Dimensionierung zudem erschwert durch eine Reihe von Beeinflussungsfaktoren, die hohe Sicherheitszuschläge erfordern: Höhe des Aufstellungsortes über dem Meer, Luftfeuchtigkeit, Witterung (Nebel, Regen, Schnee, atmosphärische Überspannungen), Luftverschmutzung (Salznebel, Industriestaub) und andere.

2. Eigenschaften von Schwefelhexafluorid (SF_6)

2.1 Allgemeine Eigenschaften

Als besonders geeignet für die Verwendung als gasförmiges Isolier- und Löschmedium hat sich SF_6 erwiesen. Es ist unbrennbar, ungiftig, geruch- und farblos und ist – bedingt durch seinen symmetrischen Molekülaufbau – chemisch äusserst stabil und inert (bis etwa 500 °C), verhält sich also ähnlich wie ein Edelgas.

Fig. 1 zeigt die Sättigungs-Dampfdruckkurve (Verflüssigungslinie) von SF_6, wobei *a* den flüssigen und *b* den gasförmigen Bereich darstellt. In einem abgeschlossenen Gasvolumen bleibt bei einer Temperaturänderung die Dichte konstant, während der Druck mit zunehmender Temperatur ansteigt (Kurven 1, 2 und 3). Da die dielektrische Festigkeit unabhängig von der Temperatur bei gleichbleibender Dichte konstant bleibt, ist diese, und nicht der Druck, für die dielektrische Dimensionierung von Geräten bestimmend. Trotzdem wird in der Praxis meist nicht die Dichte eines Gases, sondern dessen Druck (bei 20 °C) angegeben, weil er eine leichter verständliche und einfacher messbare Grösse ist. Bei einer Gasdichte des

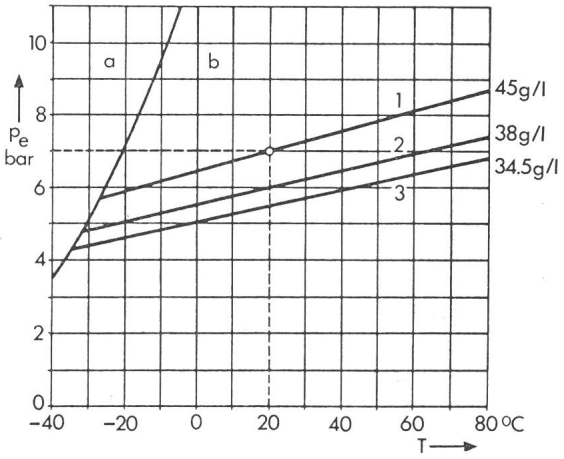


Fig. 1 Dampfdruckkurve des SF_6 und Kurven gleicher Dichte (1, 2, 3) als Funktion der Temperatur
a flüssiger Bereich *b* gasförmiger Bereich

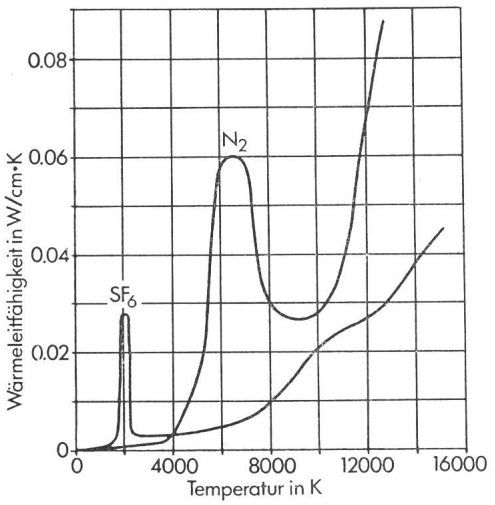


Fig. 2 Wärmeleitfähigkeit von SF_6 und Stickstoff in Abhängigkeit von der Temperatur

SF_6 von 45 g/l sinkt beispielsweise der Druck zwischen + 20 °C und − 27 °C von 7,0 auf 5,7 bar (Kurve 1). Nach Erreichen der Verflüssigungslinie bei − 27 °C fallen dann Druck *und* Dichte wegen teilweiser Verflüssigung sehr rasch weiter ab. Ein mit 45 g/l (7 bar bei + 20 °C) gefüllter SF_6-Apparat ist daher nur bis zu Temperaturen von − 27 °C einsetzbar. Für noch tiefere Umgebungstemperaturen ist die Dichte des SF_6-Gases zu reduzieren (für − 35 °C z. B. auf 34,5 g/l entsprechend Kurve 3 in Fig. 1) oder eine zusätzliche Heizung der Geräte ist vorzusehen. Da der Verflüssigungspunkt nicht vom Gesamtdruck, sondern nur vom Partialdruck des SF_6 abhängt, kann die durch Verminderung der Gasdichte bewirkte Absenkung des Isolationsniveaus durch Zumischung eines anderen Gases (z. B. Stickstoff N_2) kompensiert und so eine zusätzliche Heizung vermieden werden.

2.2 Dielektrisches Verhalten von SF_6

SF_6-Gas besitzt bei gleichem Druck eine etwa 2,5- bis 3mal höhere elektrische Festigkeit als Luft oder praxisnäher ausgedrückt: Die gleiche elektrische Festigkeit wie die von Druckluft wird von SF_6 schon bei wesentlich tieferen Drücken erreicht. Für SF_6-gefüllte Apparate ergibt sich damit – wegen des geringeren benötigten Druckes – eine viel leichtere, einfachere und damit auch billigere Konstruktion als dies bei Verwendung von Druckluft möglich wäre. Bei geringerem Druck ist ausserdem die notwendige, sehr hohe Dichtigkeit der Geräte wesentlich leichter beherrschbar.

2.3 SF_6 als Schaltmedium

SF_6 ist nicht nur ein sehr gutes Isoliergas, sondern bewährt sich auch als Schaltmedium ausgezeichnet. Die Gründe für die hervorragenden Löscheigenschaften des SF_6 sind in [1][1]) ausführlich dargelegt und mit anderen Löschmedien wie Druckluft, Öl oder Vakuum verglichen. Es seien daher nur einzelne herausragende Eigenschaften erwähnt:

– SF_6 hat bei einer Temperatur von etwa 2000 K eine sehr hohe spezifische Wärme und dementsprechend auch eine hohe Wärmeleitfähigkeit (Fig. 2), welche kurz vor und im Nulldurchgang des Stromes die Abkühlung des Lichtbogenplasmas begünstigt und damit die Lichtbogenlöschung erleichtert. Luft bzw. Stickstoff besitzen zwar bei ca. 6000 K ein ähnliches Wärmeleitfähigkeitsmaximum, das jedoch bei 4000 K schon weitgehend abgeklungen und daher nicht gleich wirksam ist.

– Das elektronegative Verhalten des SF_6, d.h. die Eigenschaft, freie Elektronen einzufangen und negative Ionen zu bilden, ist zwar in erster Linie für die hohe elektrische Durchschlagsfestigkeit verantwortlich, begünstigt aber auch eine rasche Wiederverfestigung der Schaltstrecke unmittelbar nach dem Erlöschen des Lichtbogens.

– Die niedrige Schallgeschwindigkeit in SF_6 (137 m/s in SF_6 gegenüber 340 m/s in Luft) macht die Anwendung des sehr einfachen und wirtschaftlichen Blaskolbenprinzips für Leistungsschalter nur bei SF_6 möglich.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

3. SF_6 als Löschmittel bei Innenraum- und Freiluftschaltern

Messbares Resultat des grossen Fortschrittes in der Schaltertechnik ist die drastische Reduktion des Schaltergewichtes um den Faktor 5 bis 6 in den letzten 20 Jahren: 1,2 bis 1,6 kg/MVA 1960 gegenüber 0,2 bis 0,35 kg/MVA 1978, wobei die tieferen Werte für Höchstspannungsschalter, die höheren für den 100-kV-Bereich gelten.

Zwei Marksteine dieser Entwicklung seien besonders herausgegriffen: Anfang der sechziger Jahre brachte bei Gasschaltern der Übergang von der einfach beblasenen Schaltstrecke (mit einer Düse und einem Schaltstift) zur Doppeldüsenanordnung etwa eine Verdoppelung der Ausschaltleistung pro Unterbrechungsstelle, und Anfang der siebziger Jahre konnte die Ausschaltleistung des SF_6-Zweidruckschalters (15...20 bar) mit dem SF_6-Eindruck-Blaskolbenschalter (4...6 bar) erreicht werden. Beim Blaskolbenschalter wird der für die Lichtbogenlöschung notwendige Differenzdruck des Löschgases in der Löschkammer erst während der Ausschaltung durch eine Kolbenbewegung erzeugt. Die aufwendige Aufrechterhaltung und Überwachung von zwei Druckniveaus wird dadurch vermieden, das Dichtungsproblem weitgehend entschärft, und der allgemeine Einsatz von Aluminium als Kapselungsmaterial wird wegen des geringeren Druckes überhaupt erst möglich. Dieses sehr einfache Konstruktionsprinzip hat wesentlich zur raschen Einführung der SF_6-Technik in den Schalter- und Anlagenbau beigetragen. Die notwendige Antriebsenergie ist aber naturgemäss grösser als beim Druckluftschalter, bei dem die für die Ausschaltung benötigte Löschenergie nicht vom Antrieb aufgebracht werden muss, sondern in der zentral erzeugten Druckluft gespeichert ist. Für Schalter mit 4 und mehr Löschkammern bietet diese zentrale Erzeugung der Löschenergie wirtschaftliche Vorteile, so dass im Höchstspannungsbereich kein kostenmässiger Anreiz besteht, vom bewährten Löschsystem des Druckluftschalters abzugehen.

Im Bereich bis 300 kV ist es dagegen möglich, mit nur 2 Löschkammern pro Schalterpol auszukommen und dabei die heute üblichen Ausschaltströme bis 63 kA zu beherrschen. Die Einfachheit des Blaskolbenschalters kommt so voll zur Geltung (Fig. 3).

Im Mittelspannungsbereich hat sich der ölarme Schalter für normale Anforderungen ausgezeichnet bewährt, und er stellt daher auch das am häufigsten angewendete Schaltprinzip dar. Trotzdem besteht heute für manche Anwendungen ein gewisser Trend, auf öllose Technik überzugehen, besonders überall dort, wo ein Brand mit Sicherheit ausgeschlossen werden muss, wie es in vielen Bereichen der Industrie (Bergbau, Petrochemie usw.) unabdingbare Forderung ist. Das Vorrücken von Mittelspannungsanlagen in den unmittelbaren Lebensraum der Bevölkerung, wie beispielsweise in Grossbauten, erfordert eben-

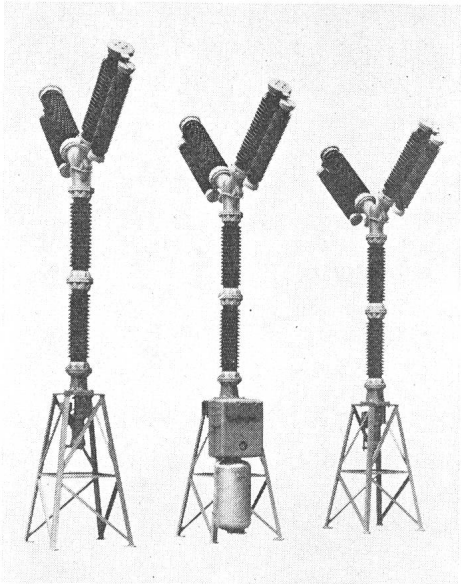


Fig. 3
SF_6-Freiluftschalter nach dem Eindruck-Blaskolbenprinzip für 245 kV und einen Nennausschaltstrom von 40 kA

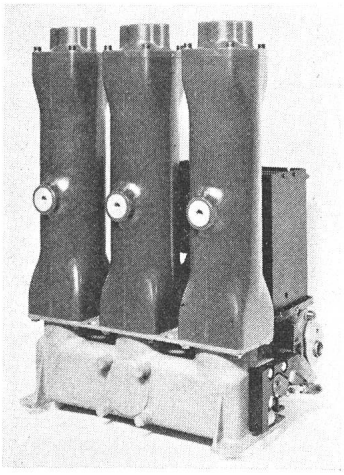


Fig. 4
SF_6-Innenraumschalter, Typ HB für 24 kV mit Federkraftspeicherantrieb für Einbau in geschottete und gekapselte Felder nach dem Selbstblasprinzip

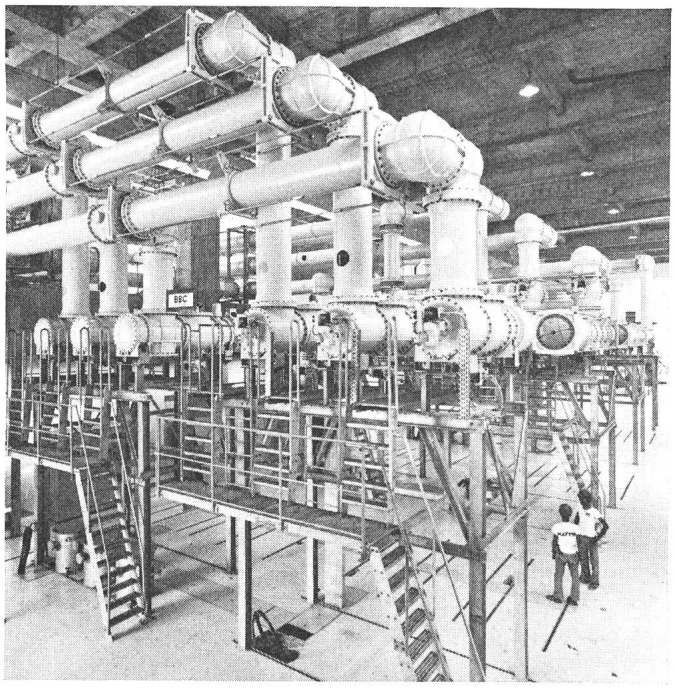


Fig. 5 **SF_6-gekapselte Schaltanlage für 525 kV, Anlage Grajau, Rio de Janeiro (BR)**

falls eine öllose Technik, die höheren Sicherheitsanforderungen entspricht. Von besonderem Vorteil ist dabei auch die Wartungsarmut des SF_6-Schalters. Da im Mittelspannungsgebiet die notwendigen Ausschaltleistungen vergleichsweise klein sind, ist hier ein noch einfacheres Löschprinzip möglich. Der in Fig. 4 gezeigte SF_6-Schalter für 24 kV arbeitet nach dem Selbstblasprinzip, bei dem die für die Lichtbogenlöschung benötigte Gasströmung durch die Lichtbogenenergie selbst erzeugt wird.

4. Gekapselte SF_6-Anlagen

SF_6-Anlagen haben in den letzten Jahren ein breites und sich immer noch erweiterndes Anwendungsfeld gefunden. Trotzdem wird in den nächsten Jahrzehnten auch die konventionelle Anlagentechnik einen wichtigen Marktanteil behalten, und man wird in jedem Einzelfall entscheiden müssen, welche der beiden Techniken den jeweils gestellten Anforderungen am besten entspricht.

Anfänglich beschränkte sich die Nachfrage nach SF_6-Anlagen hauptsächlich auf Stationen in dicht besiedelten Gebieten, in denen für konventionelle Anlagen kein ausreichender Platz gefunden werden konnte oder wo auf beschränktem Platz eine vorhandene Mittelspannungsanlage bei gleichem Raumbedarf durch eine leistungsfähigere Hochspannungsanlage ersetzt werden musste. Es wurden jedoch rasch die zusätzlichen Vorteile von gekapselten SF_6-Anlagen erkannt, so dass heute in aller Welt auch Höchstspannungsanlagen bis 525 kV (Fig. 5) in gekapselter Technik errichtet werden [2]. Wesentliche Gründe für die Wahl einer SF_6-Anlage können dabei sein:

- Wegfall des Verschmutzungsproblems der Isolatoren (Industriestaub, Salzverschmutzung in Küstennähe);
- geringere Kosten für die Erschliessung und Gestaltung des benötigten Landes (besonders bei felsigem und unebenem Gelände);
- Möglichkeit, Schaltanlagen auf Staudämmen, in Kavernen, in lawinengefährdeten Tälern oder unter sonstigen extremen Umweltbedingungen zu errichten.

Für die Planung bietet die gekapselte Anlage den Vorteil, dass das vorhandene Baukastensystem verschiedensten Anforderungen bezüglich Auslegung und Schaltschema leicht angepasst werden kann, dass der grösste Teil der Projektierung vom Lieferanten geleistet wird, dass die Montage vor Ort nur wenig Zeit erfordert und dass die einzelnen Teile der Anlage zum Beispiel hinsichtlich Stromtragfähigkeit und Beherrschung der dynamischen Kräfte genau aufeinander abgestimmt sind, womit ein Koordinationsgrad erreicht wird, der bei konventionellen Anlagen mit Einzelapparaten oft recht verschiedener Herkunft kaum realisiert werden kann.

Nach Ansicht einzelner Gesellschaften, die sich mit der Planung künftiger UHV-Übertragungen mit Nennspannungen über 1000 kV beschäftigen, kommen für diese Spannungsebenen überhaupt nur gekapselte Anlagen in Frage, da der Platzbedarf bei konventioneller Ausführung prohibitiv gross ist.

Eine Kombination von Teilen gekapselter SF_6-Anlagen mit solchen von konventionellen Anlagen wird als Hybridanlage bezeichnet. Zur Diskussion stehen heute zwei Grundvarianten:

- Schaltgeräte, Wandler und eventuell Trenner in SF_6-gekapselter Technik (Schalterblock), Sammelschiene konventionell;
- SF_6-gekapselte Sammelschienen, Apparate konventionell.

Eine Gegenüberstellung des Platzbedarfs im Vergleich zur konventionellen Technik zeigt Fig. 6. Während bei Variante A die Platzeinsparung nur etwa $^1/_3$ beträgt, liegt sie für Variante B für Anlagen mit Einfachsammelschienen (B_1) bei etwa 50% und für Doppelsammelschienen (B_2) bei 65...70%. Der Platzbedarf einer vollgekapselten SF_6-Anlage ist naturgemäss noch wesentlich geringer.

5. Umgang mit SF_6

5.1 Reines SF_6

Wie bereits ausgeführt wurde, ist SF_6 eines der stabilsten Gase und weder brennbar noch giftig. Der Hersteller von SF_6 muss bei der Lieferung zudem den Nachweis erbringen, dass das SF_6-Gas keine giftigen Verunreinigungen enthält. Recht hohe Beimengungen von SF_6 zur Atemluft sind ohne weiteres verträglich. Für den Menschen kommt es nicht auf die in der Atemluft enthaltene SF_6-Menge an, sondern lediglich darauf, dass die Atemluft noch genügend Sauerstoff enthält. Da der normale Sauerstoffgehalt der Luft bei 20% und die letale Grenze für den Menschen bei 12...13% Sauerstoff liegt, ist eine Zumischung bis zu 40% SF_6 mindestens kurzzeitig möglich.

Die maximale Arbeitsplatzkonzentration von SF_6 bei täglich 8stündigem Aufenthalt (MAK-Wert) wird in den Vorschriften einzelner Länder (CH, D, USA) auf 1000 ppm begrenzt, liegt also um mehr als 2 Grössenordnungen tiefer als die oben angegebene Gefährdungsgrenze. Dieser sehr tiefe Wert soll einmal den Langzeitaufenthalt in einem solchen Luft-SF_6-Gemisch berücksichtigen, und zum anderen wird er für alle als ungefährlich betrachteten Gase vorgeschrieben, die nicht bereits seit Jahrtausenden in der Atmosphäre natürlich vorkommen.

In welcher Grössenordnung die tatsächlich auftretenden und denkbaren SF_6-Konzentrationen liegen können, soll anhand der SF_6-Schaltanlage La Fortaille in Genf gezeigt werden. Diese 245-kV-Anlage ist in einer Halle mit einem Volumen von 6141 m³ untergebracht. Die SF_6-Anlage enthält 2250 kg SF_6-Gas, was 2250 kg : 6,14 kg/Nm³ = 366 Nm³ (Normal m³) entspricht.

– Der Gasverlust von SF_6-Anlagen wird heute mit max. 1% pro Jahr garantiert, und wie die Erfahrung zeigt, ist dieser Wert ohne Schwierigkeiten einzuhalten. In einem Jahr entweichen also aus obiger SF_6-Anlage maximal 3,66 Nm³ SF_6. Wäre die Halle absolut dicht und würde kein Luftaustausch erfolgen, so würde nach einem Jahr der SF_6-Gehalt 0,06% oder 600 ppm betragen, würde also noch gut unter dem zulässigen MAK-Wert liegen. Tatsächlich wird aber in solchen Anlagen – zusätzlich zum natürlichen Luftaustausch – immer eine Belüftungsanlage vorgesehen, die auch bei normalem Betrieb von Zeit zu Zeit (ca. 1mal monatlich) eingeschaltet wird, so dass obiger Konzentrationswert des SF_6 bei weitem nicht erreicht werden kann.

– Gekapselte SF_6-Anlagen sind immer in mehrere, in sich abgeschlossene Gasräume unterteilt. Als ungünstigster Fall bei einer Havarie muss daher der plötzliche Gasverlust aus dem grössten Gasraum angenommen werden. Im Falle der Anlage La Fortaille ist dies der Sammelschienenraum, der 200 kg oder 32,6 Nm³ Gas enthält. Daraus ergibt sich ein SF_6-Gehalt von 0,53% oder 5300 ppm, ein Wert, der als völlig ungefährlich zu betrachten ist. Der zulässige MAK-Wert wird allerdings überschritten, und vor einem längeren Aufenthalt, d.h. vor Beginn der Revisionsarbeiten, ist selbstverständlich die Belüftungsanlage einzuschalten.

Da SF_6-Gas fünfmal schwerer als Luft ist, ist es allerdings möglich, dass in tiefgelegenen Gebäudeteilen, Kabelkanälen usw. eine erhöhte Konzentration auftritt, ähnlich wie es vom

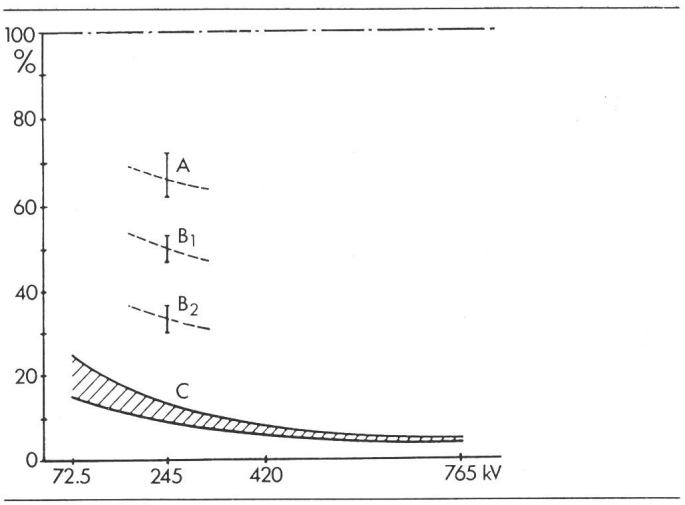


Fig. 6 Platzbedarf von SF_6-gekapselten Anlagen (Kurve C) und Hybrid-Anlagen im Vergleich zu konventionellen Anlagen (100%) [3; 4]

A Hybridanlage mit SF_6-gekapselten Geräten und konventioneller Sammelschiene

B Hybridanlage mit SF_6-gekapselter Sammelschiene und konventionellen Geräten (B_1 Einfach-SS, B_2 Doppel-SS)

Kohlendioxid (CO_2) allgemein bekannt ist. Solange in einem Behälter ein gewisser Überdruck herrscht, wird das Gas bei einer Leckage relativ rasch ausströmen und sich dabei mit der Umgebungsluft gut durchmischen. Ist der Druck jedoch auf 1 bar abgesunken, so wird nur mehr eine sehr langsame Diffusion des Gases stattfinden. Das SF_6-Gas lässt sich auch aus einem Behälter – ganz ähnlich wie eine Flüssigkeit – ausgiessen und fliesst dann an die tiefste Stelle des Raumes. Während die Vermischung von SF_6 und Luft unter Umständen ein recht langsamer Vorgang sein kann und dann nur durch Diffusion zwischen den beiden dem Schwerefeld unterliegenden Gaswolken erfolgt, tritt eine Entmischung eines Luft-SF_6-Gemisches nicht ein. Der Konzentrationsunterschied in 20 m Höhe beträgt nach genügend langer Zeit 1%.

5.2 Sekundärprodukte des SF_6 nach Lichtbogeneinwirkung

SF_6-Gas wird während der Ausschaltung im Leistungsschalter und im Störungsfall bei einem Überschlag sehr hohen Lichtbogentemperaturen ausgesetzt. Es können dabei neue, d.h. vorher nicht vorhandene schwefel- und/oder fluorhaltige Verbindungen entstehen, die häufig als Zersetzungsprodukte bezeichnet werden. Dieser Ausdruck ist jedoch nicht korrekt und irreführend und sollte daher möglichst vermieden werden. Zur Darlegung des tatsächlichen Sachverhaltes ist es notwendig, einen ganz kurzen Überblick über die Lichtbogenphysik zu geben.

Gase sind bei normalen Temperaturen elektrisch nicht leitend, bei hohen Temperaturen jedoch – sobald im Gas genügend Ionen und Elektronen vorhanden sind – sehr gute elektrische Leiter. Die hohe Lichtbogentemperatur wird durch den Leistungsumsatz im Lichtbogen ($I^2 \cdot R_{Lb}$ bzw. $U_{Lb} \cdot I$) aufrechterhalten. Das erste Aufheizen des Gases unmittelbar vor der Bildung des Lichtbogens kann dagegen verschiedene Ursachen haben, die jedoch hier nicht von Interesse sind.

Bei Temperaturen von einigen tausend K ist keine chemische Verbindung beständig. Beim SF_6-Molekül erfolgt eine schrittweise Dissoziation über SF_4 und SF_2 etwa im Temperaturbereich zwischen 1000 und 3000 K, wobei ab 1000 K freie

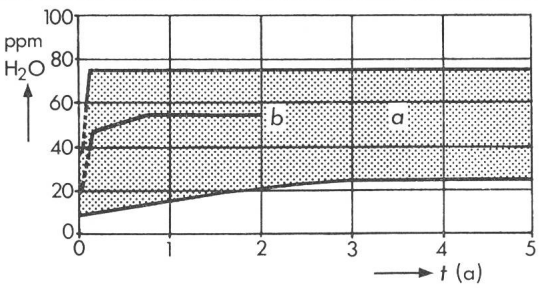


Fig. 7 Feuchtigkeitsgehalt H_2O im Gas von SF_6-Schaltanlagen in Abhängigkeit von der Betriebsdauer

a Streubereich der in verschiedenen Gasabteilen gemessenen Werte

b bei Entwicklungsversuchen gemessene Werte

Fluoratome und ab 2000 K freie Schwefelatome auftreten. Oberhalb 6000 K enthält das Gas nur mehr Atome. Ab 3000 K werden die vorhandenen S-Atome und ab 6000 K die F-Atome ionisiert, d.h., ein oder auch mehrere Hüllelektronen werden dem Atom bei thermischen Zusammenstössen mit anderen Atomen oder Ionen entrissen. Das Gas enthält nunmehr positiv geladene Schwefel- und Fluorionen und freie Elektronen. Es ist damit elektrisch leitend und zum Plasma geworden.

Beim Verlöschen des Lichtbogens kühlt sich das Plasma sehr rasch ab (thermische Zeitkonstante in der Grössenordnung von µs), und es läuft der umgekehrte Vorgang wie bei der Aufheizung ab, d.h., freie Elektronen werden von Ionen eingefangen und diese werden damit wieder zu neutralen Atomen. Schwefel- und Fluoratome rekombinieren zu SF_6.

SF_6 ist auch im praktischen Ablauf das wesentliche Rekombinationsprodukt, während als (kurzlebige) «Zersetzungs- oder Abbauprodukte» eigentlich nur SF_4 und SF_2 sowie die freien Schwefel- und Fluoratome (bzw. Ionen) bezeichnet werden dürfen.

Technisches SF_6 hat gemäss der Spezifikation (CEI-Publ. 376) eine Reinheit von 99,9 Gew.-% SF_6 und darf an Verunreinigungen enthalten: 0,05% CF_4, 0,05% O_2+N_2 (oder Luft), 15 ppm H_2O und 1 ppm HF. Nach dem Füllen der Apparate mit SF_6 steigt der Feuchtigkeitsgehalt des Gases in den ersten Tagen etwas an, weil Feuchtigkeit aus den Isolatoren aufgenommen wird, bleibt dann aber über Jahre konstant, wobei die Feuchtigkeitswerte etwa zwischen 20 und 100 ppm liegen (Fig. 7).

Bei der Rekombination des abkühlenden Plasmas sind unter technischen Bedingungen daher nicht ausschliesslich S- und F-Atome im Verhältnis 1 : 6 vorhanden, sondern immer auch Spuren von Sauerstoff, Wasserstoff, Stickstoff und anderen, die untereinander oder mit S- und F-Atomen zu neuen Molekülen rekombinieren können. Diese Produkte werden als Sekundärprodukte bezeichnet. Eine Reihe von Publikationen über die bei Lichtbogeneinwirkungen entstehenden Sekundärprodukte des SF_6 sind bereits in den fünfziger Jahren erschienen, weil diese Frage für die Verwendbarkeit des SF_6 in Leistungsschaltern entscheidend war und daher vor der Inangriffnahme entsprechender Entwicklungen weitgehend abgeklärt werden musste [5; 6; 7]. Die Resultate sollen hier in Form einer generellen Übersicht kurz zusammengefasst werden:

a) Gasförmige Sekundärprodukte: Die Menge der Sekundärprodukte ist in erster Linie abhängig von der im Gasraum umgesetzten Lichtbogenenergie, also vom Produkt $U_{Lb} \cdot I \cdot t$. Der Anteil der Sekundärprodukte im Leistungsschalter beträgt nach etwa 10 Kurzschlussausschaltungen bzw. nach mehr als 1000 Lastabschaltungen ungefähr 1% der Gasmenge. In der Regel werden in den Leistungsschaltern mit aktivierter Tonerde gefüllte Adsorber eingebaut, welche den grössten Teil der Sekundärprodukte und Feuchtigkeit binden.

Die Gasverluste einer Anlage führen damit – bei hermetisch abgedichtetem Gebäude – im Laufe eines Jahres zu Werten, die für die Sekundärprodukte 100mal kleiner sind als die unter 5.1 für das SF_6-Gas berechneten Werte, d.h. zu Konzentrationen von einigen wenigen ppm, die etwa den zulässigen MAK-Werten entsprechen. Die tatsächlich auftretenden Konzentrationen werden natürlich wegen des ständigen Luftwechsels in der Halle noch um einige Grössenordnungen tiefer liegen.

Ist nach vielen Betriebsjahren eine Schalterrevision notwendig, so wird das Gas in die Reservebehälter zurückgepumpt, und die vorhandenen Sekundärprodukte werden durch die eingebauten Filter adsorbiert. Entsteht bei einer Havarie ein grösserer Gasverlust, so kann der für die Sekundärprodukte zulässige MAK-Wert überschritten werden. Die Anwesenheit von Sekundärprodukten ist jedoch mit dem Geruchssinn des Menschen leicht und zuverlässig feststellbar. Der Raum ist in diesem Fall zu verlassen und darf erst wieder nach gründlicher Durchlüftung betreten werden.

Bei Lichtbogeneinwirkung bildet sich in SF_6 als wesentlichstes Sekundärprodukt stets SOF_2, dessen scharfer, SO_2-ähnlicher Geruch nach faulen Eiern bereits bei geringster Konzentration (um 1 ppm), die weit unterhalb der Gefährdungsgrenze für den Menschen liegt, wahrgenommen werden kann. Die übrigen Sekundärprodukte des SF_6, wie SO_2F_2, SOF_4, HF, treten stets in noch geringerer Konzentration auf und haben zudem höhere zulässige MAK-Werte.

b) Feste (staubförmige) Sekundärprodukte: Unter Lichtbogeneinwirkung bilden sich durch Reaktion von F- und S-Atomen mit dem Elektrodenmaterial Metallfluoride und -sulfide, wie WF_6, CuF_2 und andere. Sie sind elektrisch nicht leitend und lagern sich als Staub an den Innenwandungen der Geräte ab. Bei Apparaterevisionen wird dieser Staub mittels Staubsauger und Filterpapier abgesaugt.

Heute stehen Tausende von SF_6-Schaltern und einige hundert SF_6-Anlagen auf der ganzen Welt in Betrieb, ohne dass ein Unfall oder eine sonstige Schädigung eines Menschen durch SF_6-Gas oder dessen Sekundärprodukte erfolgt ist. Dies mag als Beweis dafür gelten, dass SF_6 keine spezifische Gefahr darstellt.

Literatur

[1] *J. Schneider:* Aufbau und Einsatzweise moderner Schalter und Kompaktanlagen im Zuge von Neuentwicklungen. Bull. SEV/VSE 69(1978)13, S. 674...679.

[2] *G. Mauthe* und *H. P. Szente-Varga:* SF_6-isolierte metallgekapselte Schaltanlagen mit Nennspannungen von 72,5 bis 550 kV. Brown Boveri Mitt. 65(1978)65, S. 220...230.

[3] *B. Stepinski:* Neuzeitliche Gesichtspunkte beim Bau von Freiluft-Schaltanlagen bis 765 kV. Brown Boveri Mitt. 65(1978)4, S. 268...275.

[4] *J. Vigreux:* Les postes blindés THT isolés au SF_6. Dix ans d'expérience industrielle. Rev. Gén. Electr. 86(1977)12, p. 968...974.

[5] *J. Almaric* e.a.: Conséquences pratiques de l'étude de la décomposition du SF_6 par l'arc. Rev. Gén. Electr. 83(1974) Numéro spécial, juin, p. 79...85.

[6] *C. Boudène* e.a.: Identification et étude de quelques propriétés des composés résultant de la décomposition du SF_6 sous l'effet de l'arc électrique dans les disjoncteurs. Rev. Gén. Electr. 83(1974)Numéro spécial, juin, p. 45...78.

[7] *W. Becher* und *J. Massonne:* Beitrag zur Zersetzung von Schwefelhexafluorid in elektrischen Lichtbögen und Funken. ETZ-A 91(1970)11, S. 605...610.

Adresse des Autors

Dr. *A. Eidinger*, BBC Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie., Abt. AG, 5401 Baden.

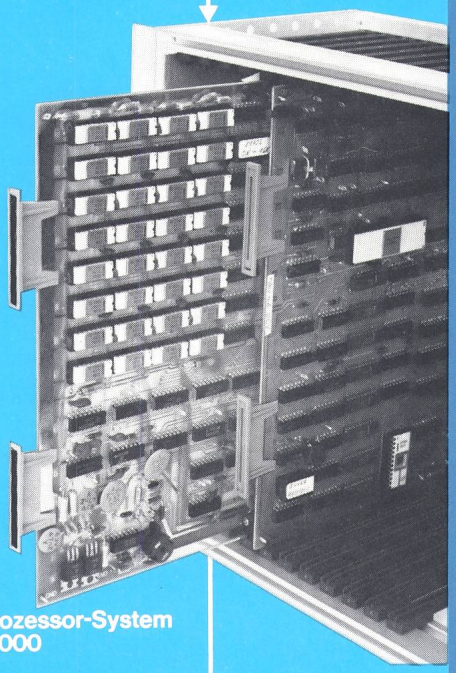
re Aufgabenstellung

- Parallele oder serielle Nahtstellenanpassung von FW-Geräten beliebigen Typs an nachfolgende DV-Systeme
- Intelligente FW-Funktionen er Datenerfassung, Ausgabe und Übertragung mit zeitechter Zwischenspeicherung
- WT-Kanalankoppelung in Befehls- und Melderichtung

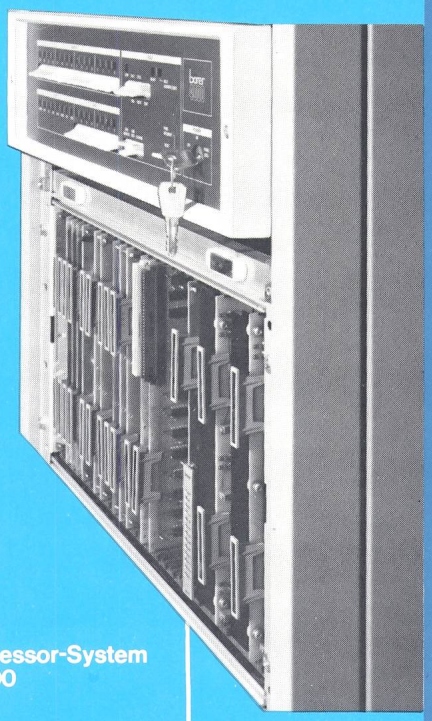
- Datenerfassung und Ausgabe in Unterstationen
- atenspeicherung und Übertragung
- Datenkonzentration
- Protokollierung
- Meldebild-ansteuerung

- Datenerfassung und Auswertung in Zentralwarten
- Anschaltung an örtliche Anlagen und FW-Geräte
- Netzbilddarstellung auf graphischen Farb-Sichtgeräten
- Automatisierung von Unterstationen mit Kopplung an Zentralwarten-Rechnersystem über WT-Kanäle

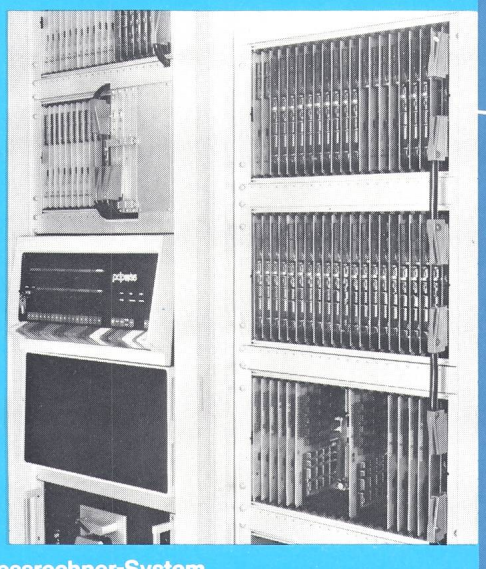
Unsere Produkt-Linie und Systembausteine



Mikroprozessor-System Borer 5000



Mikroprozessor-System Borer 4000



Prozessrechner-System

- Prozessrechner der PDP 11-Familie
- Mikroprozessor-CPU
- Speicher-Moduln
- Prozessinterface INAC
  - Analog/Digital- Converter
  - Digital/Analog- Converter
  - Multiplexer
  - Meldeeingaben statisch und dynamisch
  - Befehlsausgaben
  - Interface für FW-Geräte und WT-Kanäle
  - Test- und Prüfgeräte
- 19"-Aufnahmerahmen mit Stromversorgung
- Extern Speicher
- Protokolldrucker
- Alpha-numerische Sichtgeräte
- Graphische Farb-Sichtgeräte

borer

BORER ELECTRONICS AG
4500 Solothurn 2

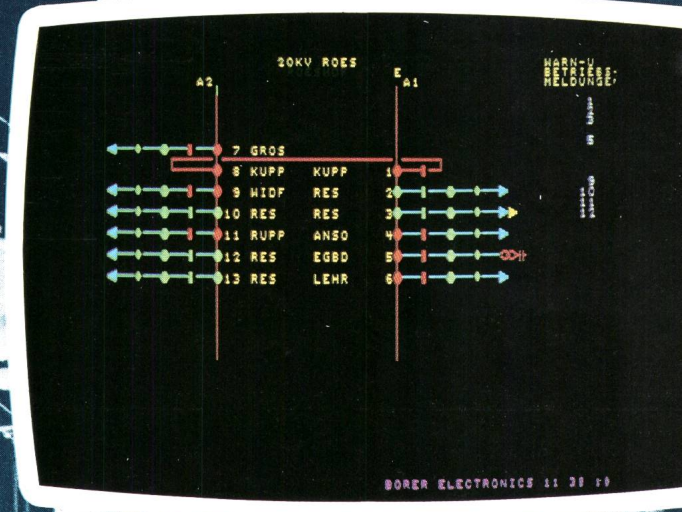
Geschäftsbereich Netzautomatisierung:

Zürcherstrasse 125
CH-8952 Schlieren/Zürich
Telefon 01/7 30 38 38

Schützenstrasse 8
D-7507 Pfinztal-Wöschbach
Telefon 0 72 40/16 20

borer Netzautomatisierun

Verteilte Intelligenz durch autonome Systeme i Unterstationen und Schaltzentrale von Versorgungsnetze



warum hat Borer zahlreiche Aufträge namhafter EVU's erhalten und mit Erfolg ausgeführt ?

- Borer kennt die Probleme des Netzbetriebes aus Erfahrung
- Borer-Systeme entlasten das Bedienungspersonal, die Übertragungswege und reduzieren den Geräteaufwand in den Zentralen
- Borer hat eine Produkt-Linie, die von der Kleinstaufgabenstellung bis zur komplexen Automatisierungsaufgabe eine wirtschaftliche Lösung bietet