

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: 65 (1974)

Heft: 1

Artikel: Schwefelhexafluorid als Lösch- und Isoliermittel in der Hochspannungstechnik

Autor: Rimpp, F.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915336>

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: 03.04.2026

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

Schwefelhexafluorid als Lösch- und Isoliermittel in der Hochspannungstechnik

Von F. Rimpp

621.315.618.9 : 546.226*161

Das Gas Schwefelhexafluorid ist in verhältnismässig kurzer Zeit ein wichtiger Faktor in der Praxis der Hochspannungstechnik geworden. Bei Leistungsschaltern von 123 kV bis zu den höchsten Spannungen wird SF₆ als Lösch- und Isoliermittel zugleich eingesetzt. SF₆-Leistungsschalter werden heute sowohl als Eindrucks- wie auch als Zweidruckschalter gebaut. Die Technik der metallgekapselten Hochspannungsschaltanlagen für Betriebsspannungen ab 72 kV war erst mit dem Grosseinsatz von SF₆ wirtschaftlich möglich. In verhältnismässig kurzer Zeit haben sich die SF₆-isolierten Anlagen auf breiter Basis durchgesetzt. Eine Weiterentwicklung der gekapselten Schaltanlagen stellen die SF₆-isolierten Rohrleiter dar. Am Beispiel eines 400-kV-Rohrleiters mit SF₆ als Isoliermittel wird gezeigt, dass der Einsatz von SF₆ über die bekannten Techniken der Schaltgeräte und Anlagen hinaus neue Möglichkeiten zur Lösung technischer Probleme bietet.

1. Das SF₆-Gas

Für das in den dreissiger Jahren entdeckte Schwergas Schwefelhexafluorid (SF₆) fand man trotz seiner bekannten guten Eigenschaften als Isoliermittel zunächst keine praktische Verwendung. Erst als man Ende der fünfziger Jahre zunächst in den USA und bald darauf in Europa die Eigenschaften dieses Gases eingehender untersuchte, fand es in schnell wachsendem Umfang Anwendung als Lösch- und Isoliermittel für Hochspannungsleistungsschalter und metallgekapselte Schaltanlagen. Die Tatsache, dass das SF₆-Gas ungiftig und nicht brennbar ist, keinen Sauerstoff enthält und chemisch ausserordentlich stabil ist, begünstigte diese Entwicklung.

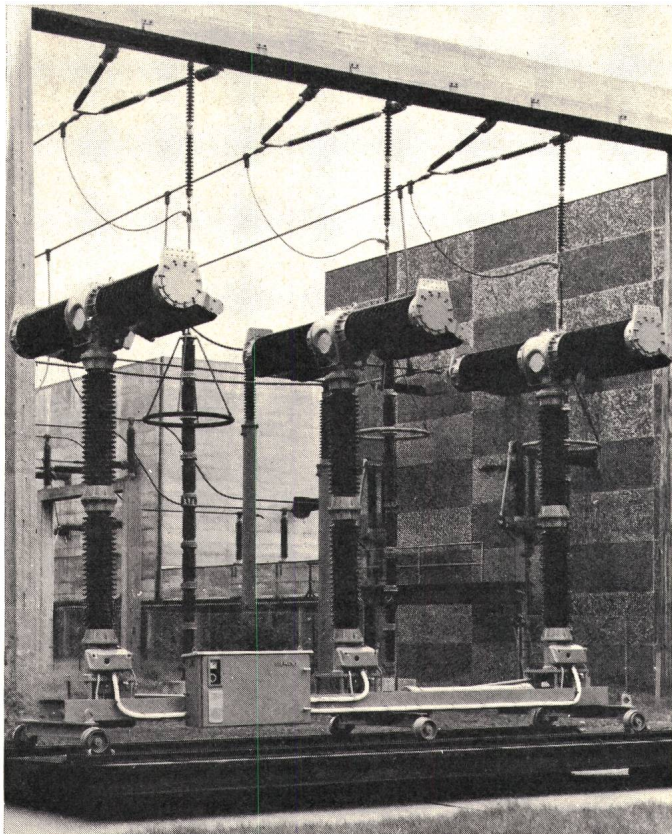


Fig. 1 SF₆-Leistungsschalter

Le gaz hexafluorure de soufre a acquis en relativement peu de temps une grande importance en technique de la haute tension. Dans des disjoncteurs pour 123 kV et les plus hautes tensions, le SF₆ sert à la fois d'agent d'extinction et d'isolant. Ces disjoncteurs au SF₆ sont maintenant construits aussi bien pour une pression, que pour deux pressions. La technique des postes de couplage blindés pour tension de service à partir de 72 kV n'est devenue économiquement possible que depuis l'emploi généralisé du SF₆; ces postes sont maintenant de plus en plus nombreux. Les conducteurs tubulaires isolés au SF₆ représentent un nouveau développement des postes de couplage blindés. En prenant comme exemple un conducteur tubulaire pour 400 kV, avec de l'hexafluorure de soufre servant d'isolant, on montre que l'emploi de ce gaz offre de nouvelles possibilités de résoudre des problèmes techniques que posent les appareils et installations de couplage modernes.

Die Durchschlagsspannung in SF₆ ist etwa zweieinhalb- bis dreimal so gross wie in Luft, da das elektronegative SF₆-Gas eine starke Affinität für freie Elektronen hat. Der Entladungsstrecke werden so laufend Elektronen entzogen. Eine Erhöhung des Druckes lässt die dielektrische Festigkeit von SF₆ vergleichsweise höher ansteigen als von Luft. Die schnelle Lichtbogenlöschung im SF₆ wird besonders unterstützt durch die günstige Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit und der Wärmeleitfähigkeit im Temperaturbereich des Lichtbogens.

Der Bogenkern mit Temperaturen von 3000...7000 K ist elektrisch gut leitend, so dass nur eine kleine Lichtbogen-spannung und ein geringer Energieumsatz auftreten. In seinen Randzonen ist aber schon unter 2000 K die dielektrische Festigkeit hoch und die thermische Leitfähigkeit gut. Schon durch den Transport geringer Gasmengen wird dem Bogen daher die Energie entzogen. Die schnelle dielektrische Verfestigung des SF₆ nach dem Stromnulldurchgang verhindert den sog. thermischen Durchschlag.

Die während der Lichtbogeneinwirkung entstehenden Spaltprodukte rekombinieren anschliessend nahezu vollständig. Die übrig bleibende geringe Menge gasförmiger Schwefelfluoride und fester Metallfluoride kann sehr einfach in Filtern gebunden werden.

2. Die Wirkungsweise von SF₆-Leistungsschaltern

Grundsätzlich können Leistungsschalter mit SF₆ als Löschmittel in 2 Gruppen eingeteilt werden:

a) Schalter nach dem Eindrucksystem

Eindruckschalter haben in ruhendem Zustand im gesamten Gerät den gleichen Druck. Die für die Lichtbogenlöschung erforderliche Druckdifferenz wird erst bei Beginn der Schaltbewegung aufgebaut. Zu diesem Zweck ist der bewegliche Schaltkontakt mit einem sog. Blaszyylinder verbunden. Bei einer Ausschaltbewegung wird das im Zylinder befindliche Gas verdichtet; es strömt über bestimmte Öffnungen zu der und durch die Kontaktanordnung. Diese Strömung bewirkt eine Kühlung der Lichtbogenfusspunkte und eine Reinigung bzw. dielektrische Verfestigung der Schaltstrecke.

b) Schalter nach dem Zweidrucksystem

Zweidruckschalter haben einen Hoch- und einen Niederdruckteil. Zwischen diesen beiden Teilen ist das sog. Blasventil angeordnet. Beim Ausschaltvorgang wird zunächst das Blasventil geöffnet.

Das im Hochdruckteil gespeicherte Gas strömt dann durch die Kontaktanordnung in den Niederdruckteil. Die Schaltstrecke wird dabei vom Lichtbogenplasma gereinigt und dielektrisch verfestigt. Ein Kompressor drückt das in den Niederdruckraum eingeströmte Gas in den Hochdruckteil zurück und stellt die ursprüngliche Druckdifferenz wieder her.

Beide Systeme gehen davon aus, dass das SF₆-Gas beim Schalten nicht ins Freie geblasen wird, sondern aus Kostengründen in einem geschlossenen Gaskreislauf verbleibt.

Die ersten Leistungsschalter mit SF₆ als Isoliermittel wurden als Zweidruckschalter gebaut. In den USA wurde 1958 eine Konstruktion vorgestellt, die in ihrem äusseren Aufbau weitgehend dem auf dem amerikanischen Kontinent noch weit verbreiteten Ölkesselschalter gleicht [1]¹⁾. Für eine Nennauschaltleistung von 15 GVA bei 245 kV wurden je Pol drei hintereinander geschaltete Unterbrechereinheiten in einem geerdeten Behälter isoliert angeordnet. Der Hochdruckbehälter war bei diesen Geräten getrennt aufgebaut; im Niederdruckbehälter war jedoch zusätzlich ein Hochdruckzwischenbehälter.

Die ersten in Europa gebauten Leistungsschalter nach dem Zweidrucksystem wurden 1965 geliefert. Es handelt sich dabei um Konstruktionen mit je zwei Unterbrechereinheiten an einer Porzellanstützersäule. Für eine Ausschaltleistung von 15 GVA bei 245 kV wurden 4 Einheiten benötigt. Der Niederdruckteil (bestehend aus den Unterbrechereinheiten und der Stützersäule) hat einen Nenndruck von 3 bar, der Hochdruckteil (bestehend aus dem Löschmittelspeicher und dem Hochdruckrohr) von 20 bar. Die Druckdifferenz von 17 bar erzeugt eine Gasströmung durch die als Doppeldüse ausgebildeten Schaltkontakte. Nach Erreichen der Mindestlöschdistanz wird bei dem ersten natürlichen Stromnulldurchgang der Lichtbogen gelöscht.

Nach einer bestimmten Zeit unterbricht das Blasventil die Löschgaszufuhr. Das aus der Löschkammer ausströmende Gas gelangt über Filter in den Stützerraum. Ein Druckwächter schaltet, bedingt durch den im Niederdruckraum angestiegenen Gasdruck, den im Schaltergestell eingebauten Kompressor ein. Dieser pumpt das SF₆-Gas über weitere Filter in den Hochdruckspeicher zurück und stellt die ursprüngliche Druckdifferenz wieder her. Der Hochdruckspeicher ist so bemessen, dass drei Ausschaltungen ohne Kompressorlauf möglich sind. Während der Einschaltbewegung findet keine Beblasung der Schaltstrecke statt. Jeder Schalterpol hat einen eigenen Gaskreislauf. Schon 1968 wurde durch eine verbesserte Gasführung und -verteilung die Zahl der Unterbrechereinheiten für den 245-kV-Schalter nach dem SF₆-Zweidruckprinzip von vier auf zwei reduziert. Das Konstruktionsprinzip und die Wirkungsweise sind dabei nicht verändert worden. Durch die Anordnung aller drei Schalterpole an einem gemeinsamen Grundrahmen konnte auch der SF₆-Gaskreislauf aller drei Pole zusammengefasst werden.

Nur vier Unterbrechungsstellen haben heute SF₆-Zweidruckschalter für 420 kV bis zu Nennauschaltströmen von 53 kA (entsprechend einer Nennauschaltleistung von nahezu 40 GVA).

Nachdem mit dem SF₆-Zweidruckschalter gute Erfahrungen vorlagen, wurden in verschiedenen Ländern Entwicklungen durchgeführt, um mit dem Eindruckprinzip ähnlich

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

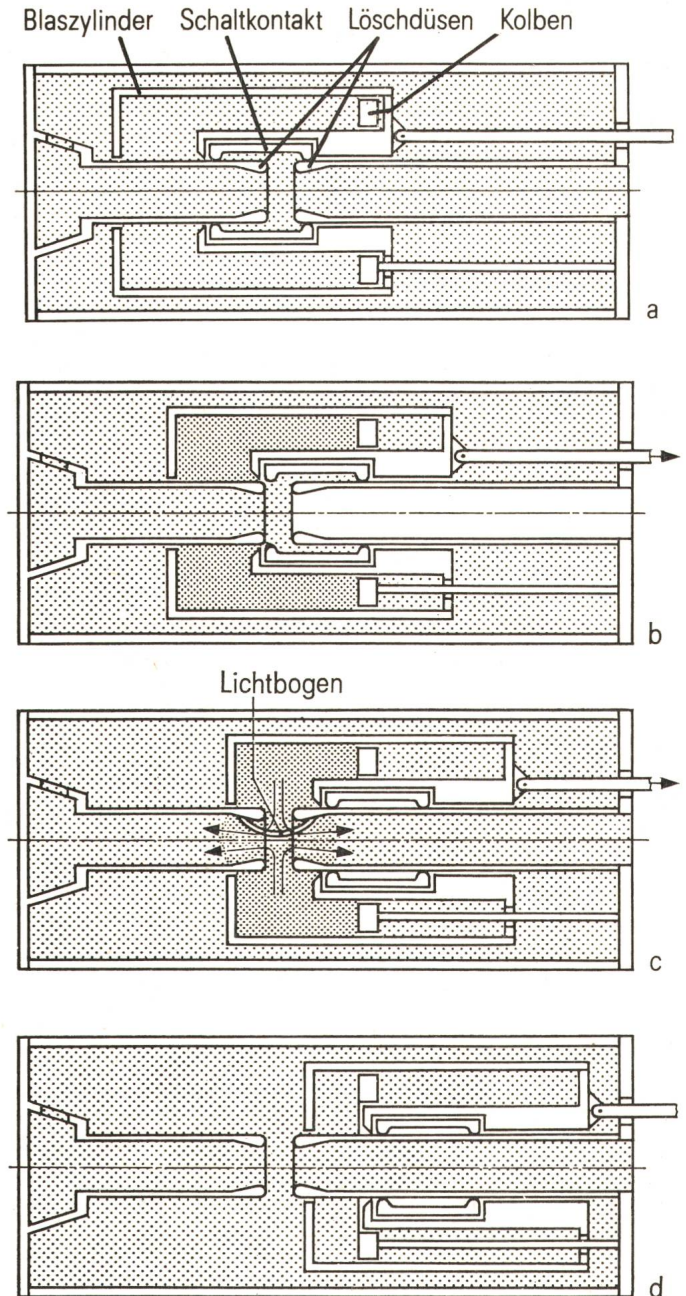


Fig. 2 Funktionsprinzip der Unterbrechereinheiten
Erklärungen siehe im Text

hohe Ausschaltleistungen und Steilheiten der wiederkehrenden Spannung mit einer entsprechend geringen Zahl von Unterbrechereinheiten zu erreichen. Dieses Ziel wurde inzwischen erreicht. Fig. 1 zeigt einen SF₆-Leistungsschalter nach dem Eindrucksystem für 245 kV mit einer Nennauschaltleistung von 15 GVA und nur zwei Unterbrechereinheiten je Schalterpol. Das Funktionsprinzip, nach dem die Unterbrechereinheiten dieses modernen Schalters arbeiten, ist in Fig. 2 dargestellt. In der Einschaltstellung (Fig. 2a) werden die Löschdüsen von einem Schaltkontakt überbrückt, der mit ringförmig angeordneten, federbelasteten Kontaktfingern ausgerüstet ist. Der Schaltkontakt ist mit einem Isolierstoff-Blaszylinder starr verbunden; Schaltkontakt und Blaszylinder bilden den bewegbaren Teil der Schaltkammer. In dem Raum zwischen Schaltkontakt und Blaszylinder ist ein ringförmiger Kolben angeordnet. Bei der Ausschaltung wird der Blaszylinder gegen diesen feststehenden Kolben be-

wegt und das vom Blaszyylinder umschlossene SF₆-Gas komprimiert.

Grunddruck, Verdichtungsverhältnis und komprimiertes Gasvolumen wurden so gewählt, dass am Ende der Verdichtung, also bereits zum Zeitpunkt der Kontakttrennung (Fig. 2b), der für die Löschung des vollen Ausschaltstromes erforderliche Löschedruck zur Verfügung steht. Die Mindestlöschedzeit ist daher unabhängig von der Grösse des zu unterbrechenden Stromes.

Mit der Kontakttrennung gibt der bewegbare Schaltkontakt, der gleichzeitig wie ein Absperrschieber wirkt, die Löschgaskströmung frei. Der Lichtbogen, der anfangs zwischen Löschküse und Schaltkontakt brennt, wird durch die Gasströmung und durch die elektrodynamischen Kräfte des Lichtbogens innerhalb weniger Millisekunden in die Löschküsen getrieben und 5...15 ms nach der galvanischen Kontakttrennung sicher gelöscht (Fig. 2c). Der Blaszyylinder umschliesst dabei die Löschanordnung wie eine Druckkammer; das komprimierte Löschgaskströmung auf kürzestem Weg radial in die Trennstelle ein und wird axial durch die Löschküsen abgeführt. Nach der Stromunterbrechung bewegt sich der Schaltkontakt weiter in die eigentliche Ausschaltstellung (Fig. 2d).

Diese Unterbrechereinheiten können nach einem Bausteinprinzip zu Leistungsschaltern für verschiedene Betriebsspannungen zusammgebaut werden. Mit 4 Unterbrechereinheiten, die auf 2 Stützsäulen montiert werden, wird z. B. ein Leistungsschalter für 420 kV und 35 GVA ausgeführt. Auch Ausführungen, die von den üblichen Konstruktionen abweichen, sind möglich. So können z. B. alle Schalter mit Mehrfachunterbrechung bei Bedarf mit Einschaltwiderständen ausgerüstet werden.

3. SF₆-isolierte Schaltanlagen

Die guten Erfahrungen mit SF₆ als Lösch- und Isoliermittel in Leistungsschaltern in Verbindung mit Fortschritten auf dem Gebiet der Technologie der Epoxidgiessharze nach 1960, die es gestatteten, extrem kleine, durchschlagfeste Isolatoren für die höchsten Spannungen zu fertigen, schufen die Voraussetzungen für den Bau wirtschaftlicher metallgekapselter SF₆-isolierter Hochspannungsschaltanlagen. Wesentliche konstruktive Elemente, wie z. B. die Unterbrechereinheiten und der Aufbau von Flansch- und Wellendichtungen, konnten von den SF₆-Leistungsschaltern in offener Bauweise praktisch unverändert übernommen werden. So war es möglich, diese neue Schaltanlagenbauweise in verhältnismässig kurzer Zeit zu entwickeln.

Die wichtigsten Vorteile, die diese neue Technik bietet, sind neben dem erheblich kleineren Flächen- und vor allem Raumbedarf der Schutz gegen Verschmutzung, die Sicherheit gegen die Berührung spannungsführender Teile und die kurzen Montagezeiten. Fig. 3 zeigt eine ausgeführte Anlage mit insgesamt 11 Feldern. Anlagen dieser Art, die für 123...170 kV gebaut wurden, sind mit Leistungsschalter nach dem Zweidruckprinzip mit einer Unterbrechereinheit ausgerüstet. Der Nennausschaltstrom beträgt 26,3 oder 31,5 kA, in Sonderfällen sind auch 40 kA möglich.

Neben Anlagen, bei denen jeder Abzweig mit einem Leistungsschalter ausgerüstet ist, werden auch solche ausgeführt, die nur teilweise mit Leistungsschalter und zum ande-



Fig. 3 SF₆-isolierte Schaltanlage

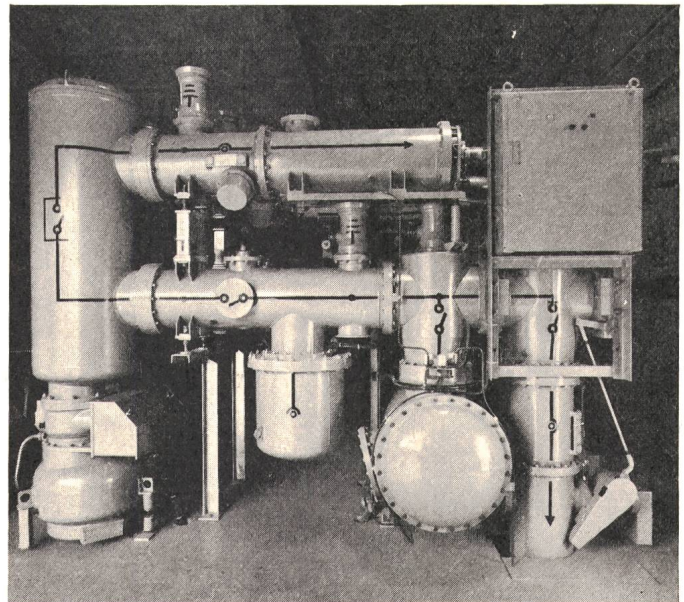


Fig. 4 Kombination von Leistungsschalter- und Lasttrennschalterabzweig

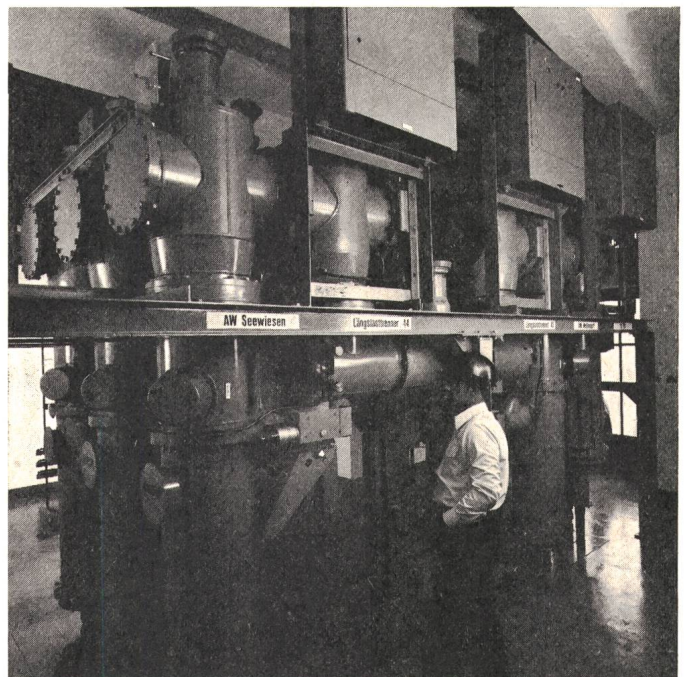


Fig. 5 Station mit fünf Lasttrennschaltern

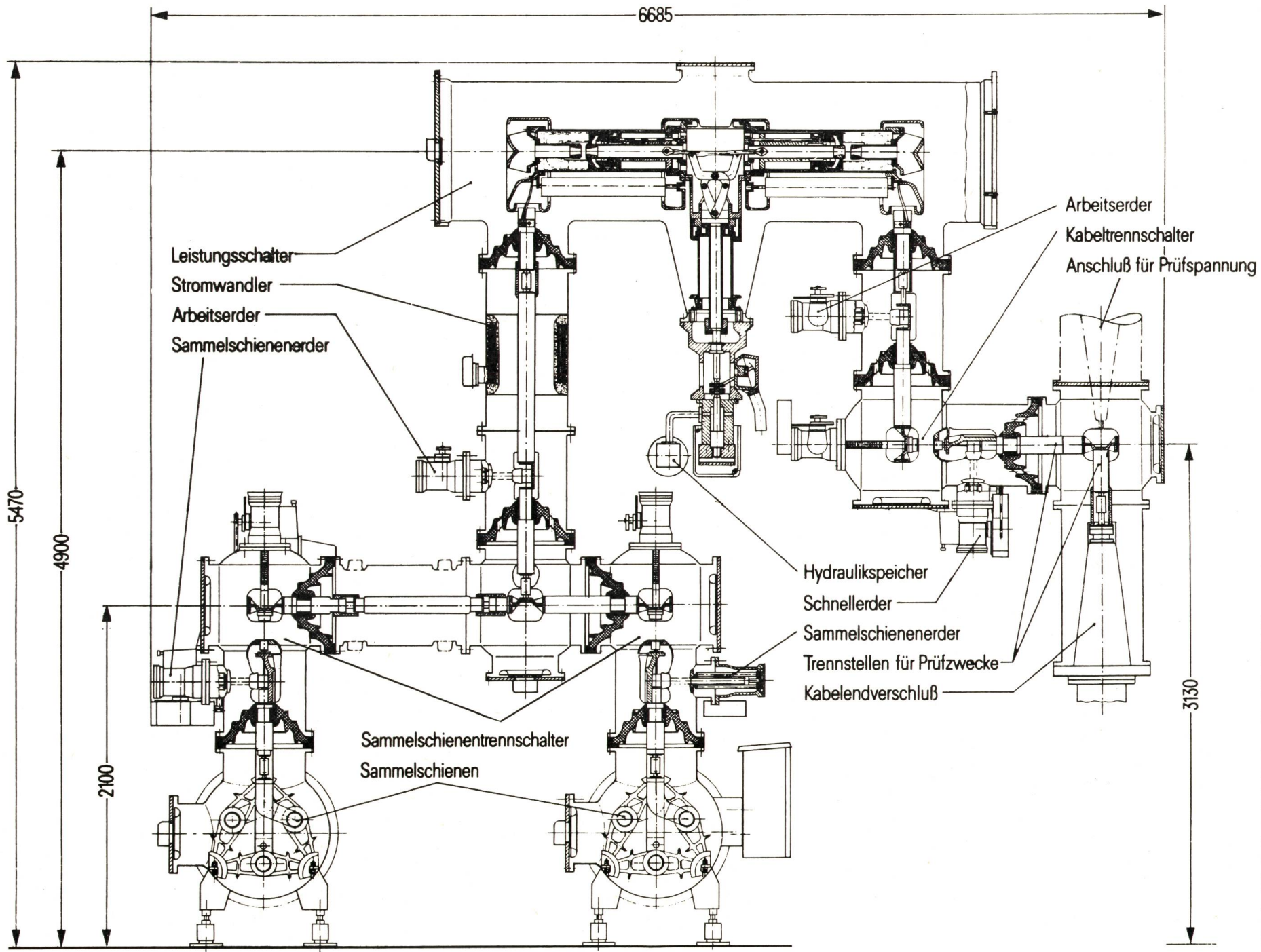


Fig. 6 SF₆-isolierte Schaltanlage für 245...300 kV

ren Teil mit Lasttrennschaltern bestückt sind. Interessante Möglichkeiten bieten sich hier vor allem für Ringkabelstationen, da hier oft nur Leistungsschalter für die Kabelabzweige oder aber die Transformatorabzweige gewünscht werden. Eine Kombination von Leistungsschalter- und Lasttrennschalterabzweig zeigt Fig. 4. Sehr vorteilhaft bei dieser Lösung ist, dass beide Abzweige gemeinsam in einer Feldteilung angeordnet werden können.

Die einfachste Ausführung einer gekapselten Anlage ist eine Stichstation, bei der nur ein Lasttrennschalter eingesetzt wird. Daneben sind aber auch Anlagen mit 3...6 Lasttrennschaltern im Einsatz. Fig. 5 zeigt eine ausgeführte Anlage, bei der die Kabelabgänge und der Transformatoranschluss sowie die Längstrennung mit Lasttrennschaltern bestückt sind.

Da der Bedarf an gekapselten Anlagen für Betriebsspannungen von 123...170 kV am grössten war, wurden zunächst Anlagen für diese Spannungen entwickelt. Inzwischen stehen aber auch SF₆-isolierte Schaltanlagen für höhere Spannungen zur Verfügung. Fig. 6 zeigt einen Schnitt einer Anlage für 245...300 kV. Es ist zu erkennen, dass wesentliche Elemente der Baureihe für die niedrigeren Spannungen übernommen werden konnten. Lediglich die Anordnung der Baugruppen wurde dem neuen Leistungsschalter, der zwei Unterbrechereinheiten hat, angepasst. Der hier eingesetzte Leistungsschalter gleicht in seinem grundsätzlichen Aufbau dem in Fig. 1 gezeigten Freiluftschalter. Es handelt sich ebenfalls um einen SF₆-Schalter nach dem Eindrucksystem; der Nennauschaltstrom beträgt 40 kA. Für die nächsthöhere Spannungsstufe von 420...525 kV erhält die Anlage einen Leistungsschalter nach demselben Prinzip mit 50 kA Nennauschaltstrom.

Die metallgekapselten SF₆-isolierten Schaltanlagen haben sich in verhältnismässig kurzer Zeit durchgesetzt und inzwischen auch ausgezeichnet bewährt. In Ballungszentren werden neue Anlagen fast ausschliesslich nur noch in dieser Technik ausgeführt. Darüber hinaus werden SF₆-isolierte Schaltanlagen in steigendem Mass im Kraftwerk- und Industriebereich eingesetzt. Da bereits heute Entwürfe bis zu den höchsten Betriebsspannungen vorliegen, wird diese neue Anlagentechnik künftig immer mehr an Bedeutung gewinnen.

4. SF₆-isolierte Rohrleiter

Die SF₆-isolierten Rohrleiter stellen eine konsequente Weiterentwicklung der metallgekapselten Hochspannungsschaltanlagen dar. Ein wesentlicher Vorteil der Rohrleiter ist die Tatsache, dass damit beträchtlich höhere Leistungen übertragen werden können als mit vergleichbaren Hochspannungskabeln. Aus diesem Grund werden die Einsatzmöglichkeiten für diese Technik immer wieder dort untersucht, wo die Übertragung grosser Leistungen erforderlich ist und Hochspannungsfreileitungen nicht geführt werden können.

Die erste grössere Anlage in Europa wird zurzeit als Energieausleitung für 400 kV Betriebsspannung in einem Kavernenkraftwerk gebaut. [2]. Den Verlauf dieser Rohrleitung sowie die Anordnung der Rohrleiter im Stollen zeigt Fig. 7. Die Gründe für die Wahl der SF₆-isolierten Rohrleiter waren hier u. a. die Überwindung eines verhältnismässig grossen Höhenunterschiedes, die Nichtbrennbarkeit des Isoliermittels

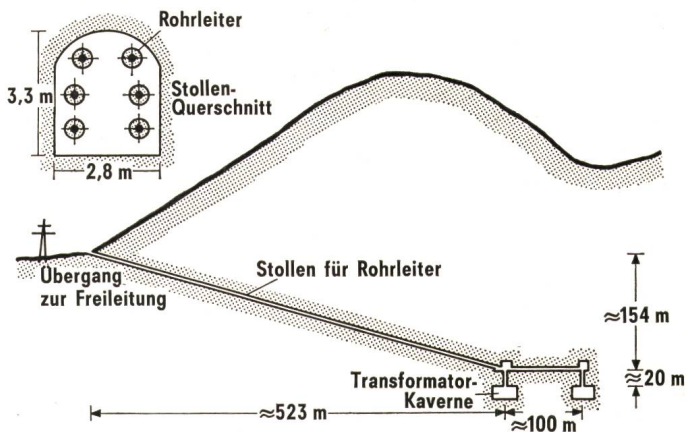


Fig. 7 Streckenführung einer SF₆-isolierten Rohrleitung für 400 kV

und die Einsatzmöglichkeit von gekapselten Überspannungsableitern an den Maschinentransformatoren. Der Nennstrom der Rohrleitung ist mit rund 900 A relativ niedrig; er wird bestimmt durch die Grösse der Transformatoren. Die Dimensionierung der Rohrleiter bestimmte neben der Betriebsspannung vor allem die gewünschte Stehstoßspannung von 1640 kV.

SF₆-isolierte Rohrleiter sind künftig vor allem für Hochleistungsübertragungen von Interesse. Aus mechanischen und technologischen Gründen ist der kleinste Nennstrom für einen 400-kV-Rohrleiter etwa 1000 A. Durch eine Vergrößerung des Leiterquerschnittes kann der Nennstrom mit einfachen Mitteln bis auf 3000 A erhöht werden. Der Rohrleiter stellt damit ein Betriebsmittel für eine echte Hochleistungsübertragung, wie sie in Ballungsgebieten erforderlich ist, dar. Mit zusätzlichen Massnahmen, wie z. B. Zwangsumlauf und Kühlung des Isoliergases oder Kühlung der Mantelrohre, ist eine weitere Erhöhung des Nennstromes auf 5000 A und mehr durchaus möglich.

Die wichtigsten Großstädte in Europa werden in absehbarer Zeit mit Spannungen zwischen 200 und 400 kV versorgt werden. Von den äusseren Versorgungsringen, die in den meisten Fällen als Freileitungen ausgeführt werden, führen dann Hochleistungsverbindungen in die Lastschwerpunkte. In den Zentren wird dabei mit Lastdichten von rund 100 MW/km² und mehr gerechnet. Da die Trassierung von Freileitungen in dicht besiedelten Gebieten immer schwieriger wird und Kabel z. B. bei 400 kV ohne zusätzliche Einrichtungen nur eine Leistung von ca. 500 MVA übertragen können, wird der Einsatz von SF₆-isolierten Rohrleitern mehr und mehr an Bedeutung gewinnen.

Literatur

- [1] O. Kopriva: SF₆-Leistungsschalter. Techn. Rdsch. 65(1973)4, S. 17...19.
- [2] F. Rimpp: SF₆-isolierte Rohrleiter zum Übertragen elektrischer Energie. ETZ-B 25(1973)5, S. 94...96.

Adresse des Autors:

F. Rimpp, Siemens AG, Postfach 325, D-8520 Erlangen 2.