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: 13

Artikel: Moderne Schaltanlagen aus der Sicht des Starkstrominspektorates

Autor: Homberger, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-914913

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: 02.12.2025

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

Moderne Schaltanlagen aus der Sicht des Starkstrominspektorates

Von E. Homberger

Entsprechend dem Aufgabenbereich des Starkstrominspektorates beschränken sich die Ausführungen auf die Beurteilung der Sicherheitsfragen von Schaltanlagen, also auf Fragen des Personen- und des Sachwertschutzes. Damit verbunden sind allerdings auch einige Probleme konstruktiver und betrieblicher Art, auf die kurz hingewiesen wird.

Compte tenu des fonctions de l'Inspection fédérale des installations à courant fort, l'auteur de cet article se limite à l'analyse des questions de sécurité relatives aux postes de couplage, donc ayant trait à la protection des personnes et du matériel. Cela implique bien entendu l'évocation de quelques aspects en rapport avec la conception et l'exploitation.

1. Was gilt als modern?

Aufgrund der dem Starkstrominspektorat unterbreiteten Projektvorlagen gelangen in der Schweiz noch vorwiegend luftisolierte Hochspannungsanlagen zur Ausführung, wobei bis zu einer Betriebsspannung von etwa 50 kV die Innenraumanlagen und darüber die Freiluftanlagen vorherrschen. In Innenraumanlagen scheint sich bei den tieferen Betriebsspannungen allmählich die Blechkapselung durchzusetzen, wogegen bei den höheren Spannungen die Zellenbauweise, allerdings mit Blechverschalungen oder Vergitterungen gegen die Kontrollgänge hin, beibehalten wurde. Zur Verminderung der Überschlagsgefahr und zur Raumeinsparung baute man verschiedenenorts ganz oder teilweise giessharzisolierte Sammelschienen ein.

Neuerdings scheint nun das Interesse für vollgekapselte, gasisolierte Anlagen zu wachsen. Es befinden sich bereits rund 10 mit Schwefelhexafluorid-Gas (SF_6) gefüllte Anlagen für Betriebsspannungen von 132 kV und mehr in Betrieb oder im Bau. Bis heute sind noch keinerlei Unfälle oder Schadenfälle an solchen Anlagen gemeldet worden.

Der schaltungsmässige Aufbau der Anlagen blieb über Jahrzehnte unverändert: Doppel- oder Einfachsammelschiene mit Umgehungsschiene bilden die Regel. Vor kurzem hat allerdings das Starkstrominspektorat einer Ringsammelschienen-Anordnung mit besonderer Trennerverteilung in einer 50-kV-Anlage zugestimmt. Die 1½-Schalter-Methode oder andere in der CIGRE diskutierte Möglichkeiten haben sich hingegen in der Schweiz nicht eingelebt.

Heute werden praktisch nur noch von einer zentralen Leitstelle oder von einer Schaltwarte aus bediente, also ferngesteuerte Anlagen erstellt. Vereinzelt traten auch schon rechnergesteuerte Anlagen in Erscheinung. In der Regel laufen allerdings nur die wichtigen Schalthandlungen über den Rechner. Die Sicherheitsfunktionen werden noch nach herkömmlicher Art ausgeführt.

2. Allgemeine Sicherheitsgrundsätze

Erfahrungsgemäss sind die Unfälle an Hochspannungsanlagen fast ausschliesslich auf Versagen der Verunfallten selbst oder ihrer Vorgesetzten zurückzuführen, wobei sich die Hintergründe des Versagens meist nicht so leicht feststellen lassen. Oft ergeben sich allerdings Hinweise dafür, dass die Disposition oder Konstruktion der Anlage für das Unfallgeschehen mitbestimmend waren. Es gilt nun, beim Bau moderner Anlagen aus den Erfahrungen Lehren zu ziehen.

Wie die folgenden statistischen Angaben zeigen, ereignen sich in Anlagen höherer Betriebsspannung bedeutend weniger Unfälle als in jenen des unteren Spannungsbereiches.

Anzahl der Verunfallten in Hochspannungsanlagen der Kraft- und Unterwerke von 1967 bis 1976:

Spannungsbereich über 25 kV:
verletzt 7, tot 3, gesamthaft 10

Spannungsbereich bis 25 kV:
verletzt 157, tot 10, gesamthaft 167

Die stärkere Verbreitung der Anlagen im unteren Spannungsbereich mit ihren geringeren Berührungsdistanzen mögen dieses Resultat stark beeinflusst haben, doch gewinnt man den Eindruck, dass der meist übersichtlichere Aufbau und die bessere Abschirmung aktiver Teile in Anlagen mit hoher Betriebsspannung zur Verminderung der Unfälle beitragen. Es wäre wohl vermessen, aus ein paar wenigen statistischen Angaben allgemeingültige Schlüsse zu ziehen. Immerhin darf daraus wohl die Richtigkeit der folgenden Sicherheitsgrundsätze abgeleitet werden:

1. Eine Anlage soll einfach, klar und übersichtlich disponiert werden; eine einmal gewählte Systematik ist in der ganzen Anlage beizubehalten. Diese Grundsätze gelten auch für das Blindschema.
2. Beschriftungen müssen kurz, auffällig und klar sein.
3. Es sollen Entscheidungshilfen für den Störungsfall vorgesehen werden (gilt auch für den allfälligen Ausfall von Steuereinrichtungen).
4. Bei Teilausschaltungen zur Vornahme von Arbeiten hat sich die Trennstelle zwischen geerdeten und unter Spannung stehenden Teilen als besonders gefährlich erwiesen. Durch konstruktive Massnahmen lassen sich gefährliche Annäherungen an unter Spannung stehende Teile verunmöglichen.

Als Unterlage für sichere Konstruktionen kann der von der Arbeitsgruppe 06 der CIGRE-Studienkommission 23 verfasste Bericht [1] dienen.

Soweit dem Starkstrominspektorat bekannt geworden ist, waren die eingetretenen *Schadenfälle* vorwiegend auf innere und äussere Überspannungen zurückzuführen. Versager an Schalt- oder Schutzeinrichtungen kamen selten vor. Hingegen fehlten gelegentlich die geeigneten Schutzapparate, oder sie waren nicht richtig eingesetzt. Natürlich spielt hier das Alter einer Anlage eine gewisse Rolle. Es scheint auch vielerorts noch Ungewissheit über die Massnahmen gegen transiente Überspannungen auf den Sekundärkreisen von Messwandlern zu bestehen. In den Erläuterungen zum Entwurf für einen neuen Abschnitt «Erdung» der Starkstromverordnung sind diesbezüglich Hinweise zu finden [2].

3. Die Besonderheiten gekapselter Anlagen

Zur Beurteilung der Sicherheitsmassnahmen bei vollgekapselten Anlagen scheint es wichtig, die folgenden Besonderheiten solcher Anlagen zu berücksichtigen:

1. Die Berührung unter Spannung stehender Teile ist unmöglich.

2. Ausserhalb der Kapselung sind Lichtbogen unwahrscheinlich.

3. Die geerdete Kapselung verhindert eine hochfrequente Beeinflussung benachbarter Schwachstromanlagen.

4. Mobile Spannungsprüfer und Erdungsvorrichtungen sind nur unter erschwerten Bedingungen verwendbar.

5. Beim Auftreten eines Lichtbogens entsteht ein beträchtlicher Druckanstieg in der Kapselung, dafür nur ein geringer Druckanstieg im Raum.

6. Die Verfolgung des Stromkreises ist erschwert.

Bei gasisolierten Anlagen sind noch die folgenden zusätzlichen Eigenheiten zu beachten:

7. Es ist mit Gasverlusten zu rechnen.

8. Die Spannungsfestigkeit der offenen Trennstrecken geht zurück, sobald das Gas abgezogen wird.

9. Es ist denkbar, dass bei einem schweren Kurzschluss-Lichtbogen qualmende, giftige Gase ausgestossen werden.

Weitere Einzelheiten können dem CIGRE-Bericht 23-04 der Session 1972 [3], ferner einer im Bulletin des SEV/VSE erschienenen Publikation [4] entnommen werden.

4. Im Anlagenbau zu berücksichtigende Vorschriften

Bei der Erstellung von Schaltanlagen sind vorab die Bestimmungen der Starkstromverordnung (StVO), insbesondere jene von Abschnitt V «Anlagen», zu berücksichtigen. Wichtige Forderungen enthalten aber auch die Abschnitte II «Allgemeine Bestimmungen», III «Schutzmassnahmen», vornehmlich die Unterabschnitte «Erdung», «Überstromschutz» und «Überspannungsschutz», ferner Abschnitt IV «Apparate».

Die im Jahre 1933 in Kraft gesetzte StVO vermag wohl dem modernen Anlagebau nicht mehr in allen Teilen zu genügen. Da es voraussichtlich noch einige Jahre dauern wird, bis eine revidierte StVO zur Verfügung steht, müssen vorläufig die Ausnahmebestimmungen von Art. 1, Abs. 3 über allfällig auftretende Schwierigkeiten hinweghelfen. Bei modernen Anlagen, insbesondere bei den gekapselten, gibt vor allem der Inhalt von Art. 42 StVO zu Diskussionen Anlass. Zum besseren Verständnis sollen hier seine wichtigsten Bestimmungen etwas gekürzt wiedergegeben werden:

1. Die Anlagen müssen klar und übersichtlich angeordnet sein, so dass eine sichere und rasche Orientierung möglich ist.

2. Alle wichtigen Anlageteile müssen leicht zugänglich sein und ohne Schwierigkeit ein- und ausgebaut werden können.

3. Die Anlagen müssen so unterteilt werden, dass der Betrieb, auch bei Ausserbetriebsetzung einzelner Anlageteile, weitgehend aufrechterhalten werden kann.

4. Die ausser Betrieb gesetzten Anlageteile oder Apparate müssen an sichtbaren Trennstellen spannungslos gemacht werden können.

Wie bereits erwähnt, muss die Forderung nach 1 als allgemeiner Sicherheitsgrundsatz auch für gekapselte Anlagen erfüllt sein. Die Erschwernis besteht indessen darin, dass sich im Vergleich zu offenen Anlagen das äussere Aussehen geändert hat, so dass – wenigstens vorläufig – die einzelnen Apparatearten nicht ohne weiteres erkannt werden, sich Pol an Pol, ohne Zwischenraum zwischen den einzelnen Feldern, aneinanderreihen lässt, ferner sich die einzelnen Apparate, vor allem die Schalter, in verschiedenen Lagen montieren lassen (Fig. 1 und 2). Dadurch ergeben sich für die Ungeübten etwelche Schwierigkeiten, dem Stromkreis zu folgen.

Die Forderungen nach 2 und 3 lassen sich bei gekapselten Anlagen entschieden besser erfüllen als bei offenen. Hingegen hat die Forderung nach 4 bei gekapselten Anlagen wenig Sinn und kann auch nur schwer realisiert werden.

5. Was beinhalten die internationalen Normen?

Im Vordergrund steht die Publikation der Commission Electrotechnique Internationale (CEI) Nr. 517 [5]. Die für Sicherheitsfragen massgebenden Abschnitte lauten, etwas frei übersetzt, folgendermassen:

Ziff. 20 «Sectionneurs»:

Trenner und Erdungstrenner, bei denen ihre Stellung sicher erkannt werden muss, erfüllen die Bedingungen, wenn ihre Stellung durch eine sichere Stellungsanzeigevorrichtung angezeigt wird. Hierüber muss Einverständnis zwischen Hersteller und Betreiber bestehen.

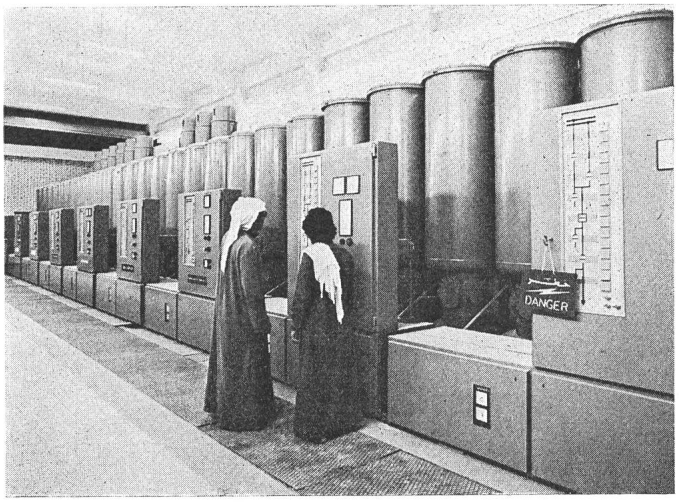

Fig. 1 **SF_6-Schaltanlage für 145 kV**
Schalter in stehender Anordnung, kein Zwischenraum zwischen den einzelnen Feldern

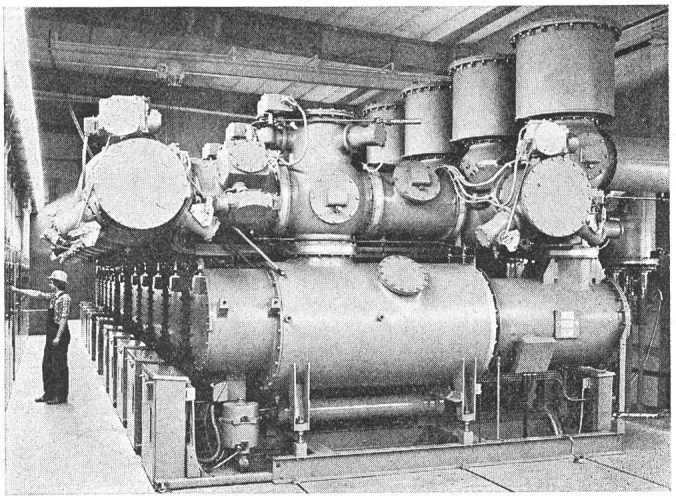

Fig. 2 **SF_6-Schaltanlage, dreipolige Kapselung**
Schalter in liegender Anordnung

Ziff. 21 «Mise à la terre et sectionneurs de terre»:

Alle Teile des Hauptstromkreises müssen zur Vornahme von Revisionsarbeiten an Erde gelegt werden können.

Die Erdungstrenner müssen mit Verriegelungsvorrichtungen versehen sein. Bezüglich der Stellungsanzeigevorrichtung gelten die bereits unter Ziff. 20 genannten Bedingungen. Zum Erden der einzelnen Anlageteile sind die folgenden Arten von Erdungsvorrichtungen vorzusehen:

a) Mit einem Einschaltvermögen (Schliessvermögen) gleich dem Scheitelwert des zulässig erklärten Stromes an Orten, wo keine Gewissheit besteht, dass der zu erdende Anlageteil spannungslos ist (gemeint sind offenbar dynamisch und thermisch einschaltfeste Erdungsvorrichtungen, von den Herstellern allgemein als «Schnellerder» [7] benannt).

b) Ohne festgelegtes Einschaltvermögen für Anlagestellen, wo Gewissheit besteht, dass sie spannungslos sind (solche Erdungsvorrichtungen werden allgemein als «Arbeitserder» benannt).

Ziff. 22 «Verrouillages»:

– Trenner vor Arbeitsstellen müssen gegen ungewolltes Schliessen gesichert werden können.

– Erdungstrenner müssen gegen ungewolltes Öffnen gesichert werden können.

– Schnellerder sollen mit den zugehörigen Trennern verriegelt sein.

– Arbeitserder sollen mit dem zugehörigen Leistungsschalter verriegelt sein.

In den bereits erwähnten CIGRE-Publikationen 23-04 der Session 1972 [3] ist unter Ziff. 3.7 «Sécurité en exploitation» folgendes erwähnt: «In gewissen Fällen benützt man nebst der Kontrolle von Stellungsanzeigen zusätzliche Einrichtungen wie: Sichtfenster, einschaltfeste Erdungstrenner, Spannungsabfallmessungen usw.»

Unter der Voraussetzung einer geeigneten Lichtquelle kann durch das Sichtfenster die Stellung des Trenners oder Erdungstrenners direkt beobachtet werden. Bei der Spannungsabfall-Messmethode geht es um den Vergleich von zwei Messwerten. Über zwei Erdungsstellen gemäss Fig. 3 wird ein bestimmter Strom geleitet, wobei der Spannungsabfall einmal bei geöffneten und einmal bei geschlossenen Trennern gemessen werden muss. Aus der ersten Messung errechnet sich der Widerstand eines Umhüllungsteilstückes, aus der zweiten der Widerstand der Parallelschaltung des Umhüllungsteilstückes und des Pfades über den Erdungstrenner 1, den dazwischenliegenden Leitungstrenner und den Erdungstrenner 2. Daraus lässt sich die Güte der Kontakt-

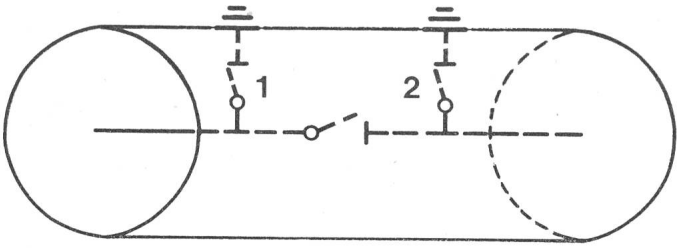

Fig. 3 Kontrolle der Übergangswiderstände der Trenner und Erdungstrenner von SF_6-Anlagen
Spannungsabfall-Methode

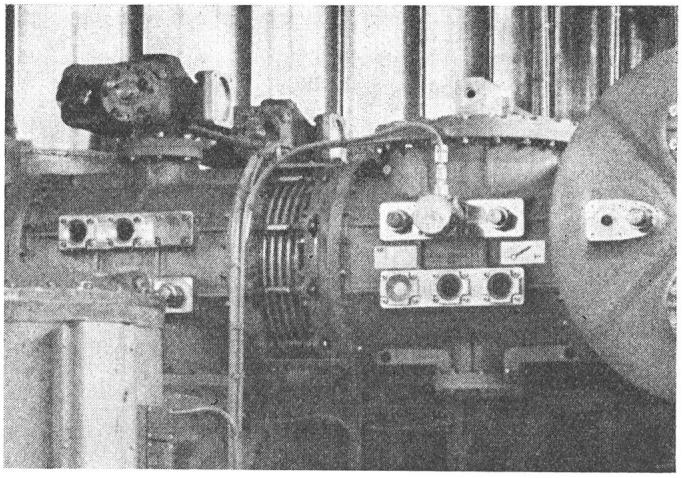

Fig. 4 Sichtfenster an SF_6-Schaltanlage

stellen der drei vorerwähnten Trenner erkennen. Das Ergebnis der Spannungsabfall-Messung ist natürlich aussagekräftiger als eine Sichtkontrolle durch ein Fenster. Indessen setzt die Spannungsabfallmessung eine geeignete Hilfsstromquelle, ein Instrumentarium und etwelche Erfahrung über die Streuung der Übergangswiderstände an Trennerkontakten und Umhüllungen voraus.

6. Was verlangt das Starkstrominspektorat?

Beim ersten dem Starkstrominspektorat unterbreiteten Projekt einer SF_6-Schaltanlage (Anlage «Sempersteig» des EW der Stadt Zürich) liessen sich die Eigenarten der damals noch neuen Technik nicht vollumfänglich überblicken. Es wurden deshalb Forderungen gestellt, die sich stark an den Wortlaut der heute noch gültigen, aber auf offene Anlagen ausgerichteten StVO hielten. Inzwischen wurden alle möglichen Sicherheitsfragen mit verschiedenen Herstellern sowie in- und ausländischen Betreibern von SF_6-Schaltanlagen besprochen. Bei den Herstellern ergab sich, abgesehen von einigen Detailfragen, eine ziemlich einheitliche Auffassung, wogegen bei den Betreibern die Meinungen zum Teil sehr unterschiedlich waren.

Dem Starkstrominspektorat stellten sich vorerst zwei grundsätzliche Fragen, nämlich:

1. Wie lässt sich überprüfen, ob eine von einer gekapselten Anlage ausgehende, zur Vornahme von Arbeiten auszuschaltende Leitung tatsächlich spannungslos ist?

2. Wie lässt sich überprüfen, ob ein aktiver Teil einer gekapselten Anlage sicher spannungslos und geerdet ist, bevor die Kapselung um diesen Teil geöffnet wird?

Zur Frage 1 ist folgendes zu bemerken: Die Nullstellung von Voltmetern kann auch heute noch nicht als sichere Anzeige des spannungslosen Zustandes gelten. Ganz abgesehen von Störungen am Meßsystem ist mit Täuschungen über die Lage des Messortes zu rechnen. Spannungslosigkeit besteht jedoch, wenn die Leitung sichtbar geerdet ist. Eine Erdungsvorrichtung mit sichtbaren Kontakten am Leitungseingang in die Anlage darf wohl als ausreichend sicheres Mittel zur Feststellung der Spannungslosigkeit betrachtet werden. Allerdings besteht noch keine Gewähr dafür, dass ein sichtbar geschlossenes Kontaktsystem auch tatsächlich kurzschlussfest verbunden ist.

Hierüber könnte die beschriebene Spannungsabfall-Messung mehr Aufschluss geben. Die gleiche Unsicherheit besteht natürlich auch bei Erdungsvorrichtungen offener Anlagen. Würde im übrigen eine übliche Erdungsvorrichtung auf einen unter Spannung stehenden Leiter eingelegt, könnte der auftretende Lichtbogen gefährliche Folgen haben. Mit Rücksicht darauf, dass in der Regel die Leitungs-Eingangsstelle durch Schalthandlungen in wenigstens zwei voneinander getrennten Stationen spannungslos gemacht werden muss, ist hier, im Sinne von der Publ. CEI 517, Ziff. 21, ein Schnellerder vorzusehen.

Das gleiche gilt grundsätzlich auch zur Beantwortung der Frage 2. Bei Arbeiten an einer Schaltanlage selbst ist jedoch die Ausschaltung nicht von Manövern in einer Fremdanlage abhängig. Es besteht somit grössere Sicherheit, dass der richtige Anlageteil spannungslos gemacht wird. Unter diesen Umständen dürfen Arbeitserder als Garant für die Spannungslosigkeit gelten. Da jedoch an gekapselte Anlagen, insbesondere an SF_6-Anlagen, Ausbauten einzelner Teile möglich sind, darf nie ein Teilstück, an dem gearbeitet wird, eine Abtrennung von der Erdung erfahren. Die Zahl der Erdungsstellen muss deshalb im Vergleich zu offenen Anlagen meist bedeutend erhöht werden.

Aufgrund dieser Überlegungen verlangt das Starkstrominspektorat für SF_6-Schaltanlagen folgendes:

1. Alle Erdungsvorrichtungen haben im geschlossenen Zustand einen definierten Erdschlußstrom sowohl thermisch als auch dynamisch bis zur Abschaltung ohne Beeinträchtigung der Erdung zu ertragen.

2. Die Erdungsvorrichtung an der Eingangsstelle einer von einer Nachbarstation ankommenden Leitung muss einschalt-kurzschlussfest gebaut sein (diese Bedingung gilt somit nicht für Generator- oder Transformatorzuleitungen am Standort der Schaltanlage).

3. Die Stellung der Schalter und Erdungsvorrichtungen soll von dem für Arbeiten verantwortlichen Personal in einfacher und zuverlässiger Weise erkennbar sein.

4. An den Erdungsvorrichtungen der zu- und wegführenden Leitungen, inbegriffen die Generator- und Transformatorleitungen, muss die Kontaktstelle direkt sichtbar sein, oder es muss eine direkte Verlängerung des beweglichen Kontaktes in den sichtbaren Bereich vorgesehen werden. Übertragungen über Zwischenglieder wie Gelenke, Zahnräder usw. werden nicht als gleichwertige Lösungen anerkannt.

Alle bisher in der Schweiz in Erscheinung getretenen Lieferanten von SF_6-Schaltanlagen waren in der Lage, Schaugläser (vgl. Fig. 4) zur Kontrolle der Schaltstellung von Erdungsvorrichtungen und Trennern in die Kapselungen einzubauen. Dessen ungeachtet sind sie der Ansicht, die Schaltstellung werde sicher und einwandfrei auf die Stellungsanzeige übertragen. Rein theoretisch scheinen mir jedoch Übertragungsfehler möglich. Es fehlen auch noch Normen für sichere Übertragungsglieder. Bedenkt man, dass die Aufgabe der sichtbaren Trenn- und Erdungsstelle doch eine beträchtliche Verminderung der bisher als notwendig erachteten Vorkehren für sicheres Arbeiten an Anlagen bedeutet, so scheint es mir sinnvoll, über die Schaugläser einen wenn auch nur kleinen Einblick ins Innere der Anlage zu ermöglichen.

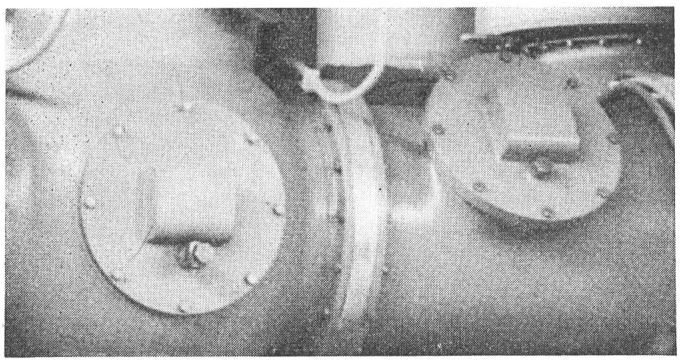

Fig. 5 Ablenkvorrichtung über Brechplatte an einer SF_6-Schaltanlage

Natürlich nützen Schaugläser nur dann etwas, wenn sie auch zugänglich sind. Es ist meines Erachtens Aufgabe des Betreibers, die Frage der Zugänglichkeit mit dem Lieferanten zu besprechen und unter Umständen durch bauliche Massnahmen im Raum für einen zweckmässigen Zugang zu sorgen.

7. Gefährdung durch Isoliergas

SF_6-Gas, das wegen seines wachsenden Interesses im Schalter- und Anlagebau hier allein in Betracht gezogen werden soll, weist verschiedene Vorteile auf. Von sicherheitstechnischer Bedeutung sind vor allem die folgenden Eigenschaften: Das Gas ist unsichtbar, unbrennbar und ungiftig. Es ist etwa fünfmal schwerer als Luft, innert bis etwa 500 °C, keiner Alterung unterworfen und weist rund zweieinhalbmal bessere Isoliereigenschaften auf als Luft. Im Gegensatz zu Luft enthält SF_6 keinen Sauerstoff, weshalb es nicht zur Oxydation von Kesseln, Kapselungen und Kontakten Anlass geben kann.

Die letztgenannte Eigenschaft wirkt sich besonders vorteilhaft aus. Nach Art. 16, Abs. 3, der Verordnung über die Aufstellung und den Betrieb von Druckbehältern bedarf die Aufstellung von Schalter-Druckbehältern einer Bewilligung durch das Starkstrominspektorat. Die Bewilligung wird aufgrund eines Berichtes des Schweizerischen Vereins für Druckbehälterüberwachung (SVDB) erteilt, das bei bestimmten neuen Behältern Druckproben vornimmt und die Proben später wiederholt. Bei Behältern für SF_6-Gas wird auf die Wiederholung von Druckproben verzichtet, da ja dieses Gas keine Veränderung der Innenwandungen verursacht.

Da das SF_6-Gas ungiftig ist, müssen auch keine besonderen Schutzvorkehren für das Revisionspersonal vorgesehen werden. Es sind lediglich Massnahmen gegen mögliche Gasansammlungen in den untersten Räumen zu treffen. Im normalen Betriebszustand bietet somit das SF_6-Gas keinerlei Schwierigkeiten.

Wie verhält sich nun aber das Gas unter der Einwirkung von Kurzschluss-Lichtbögen. Bekanntlich beträgt die Kerntemperatur von Lichtbögen mehr als 10 000 °C, so dass eine Zersetzung des Gases zu befürchten ist. Über das Verhalten des Gases bei diesen sehr hohen Temperaturen und den in Frage kommenden kurzen Einwirkzeiten weiss man noch wenig. Bekannt geworden ist, dass nichtrekombinierbare Teile von SF_6-Gas toxisch wirken, sehr stark qualmen und einen üblen Geruch verbreiten (Geruch nach faulen Eiern). Einige weitere, allerdings eher oberflächliche Angaben enthält die Publikation 480 (1974) der CEI im Abschnitt 7 «Impuretés toxiques» [6]. Wichtig erscheint mir

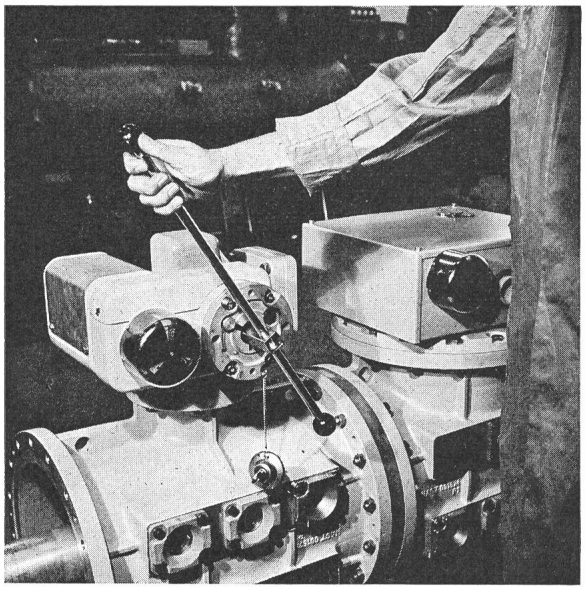

Fig. 6 Arbeitserder mit Handbetätigung

der Hinweis, dass nicht sofort eine toxische Wirkung eintritt. Wegen des penetranten Gestankes werden allfällig von einem Ausbruch zersetzten SF_6-Gases überraschte Personen automatisch ins Freie streben. Der nichtrekombinierbare Gasanteil soll im übrigen gering sein.

Kann es überhaupt zu einem Gasausstoss kommen? Beim Auftreten von Kurzschluss-Lichtbögen steigt der Druck in der Kapselung sehr rasch auf sehr hohe Werte an. Die Wandungen der kleineren Gasräume könnten dadurch aufgerissen werden, bevor die Abschaltung erfolgt. Um Beschädigungen und Gefährdungen zu vermeiden, bauen die meisten Hersteller in die Wandungen einzelner Gasräume Schwachstellen, sogenannte Brechplatten ein.

Bei einem Fabrikat, das einen Betriebsdruck von 4,5 bar anwendet, birst beispielsweise die Brechplatte bei 7 bar. Dabei wird heisses, qualmendes, mit Metallpartikeln durchsetztes Gas ausgestossen, das sich selbstverständlich ausserhalb der Anlage verbreitet. Über die Auswirkungen solcher ausgetretener Gase gehen nun die Auffassungen und Aussagen über vorgekommene Fälle weit auseinander. Während die einen von Verqualmungen bis zur Lichtundurchlässigkeit sprechen, beschrieben die andern die Vorfälle als harmlos. Präzise Angaben über Lichtbogendauer, Grösse des Kurzschlußstromes, Inhalt des aufgebrochenen Gasraumes, Zeitdauer vom Vorfall bis zum Eintreffen eines Beobachters usw. sind leider meist nicht erhältlich. Es verbleibt somit Unsicherheit. Die Abteilung Unfallverhütung der Schweizerischen Unfallversicherungsanstalt (SUVA) hat sich freundlicherweise bereit erklärt, die Gefährlichkeit ausgestossener Gase näher abzuklären. Sie kann auf die Mithilfe der Hersteller zählen, die aufgrund theoretischer Überlegungen aber auch von Versuchen über etwelche Kenntnisse verfügen. Ein erster Befund ergab, dass kein Grund zu grossen Befürchtungen besteht. Eine gewisse Vorsicht ist aber wohl am Platze. Nach Abklärung aller Detailfragen sieht die SUVA vor, ihre Feststellungen und Ansichten zu veröffentlichen.

Es empfehlen sich einstweilen folgende Vorsichtsmassnahmen:

1. Möglichst wenig Schaltungen «Vor Ort» vornehmen.
2. Nur kleine Besuchergruppen zulassen.
3. Besucher nur in den Bedienungsgängen, also nicht rund um die Anlagen gehen lassen.
4. Bei üblem Geruch nach faulen Eiern sofort den Raum verlassen, gut durchlüften und erst wieder bei vollständiger Geruchlosigkeit betreten.
5. Bei Arbeiten möglichst Schutzwände gegen die in Betrieb stehenden Anlageteile einlegen, wenigstens aber die Ablenkbleche vor den Brechplatten (Fig. 5) von der Arbeitsstelle wegrichten, unter Umständen Zusatzablenkungen montieren.

8. Zusammenfassung und Ergänzungen

Bei gekapselten Anlagen ist im normalen Betriebszustand eine Berührung unter Spannung stehender Teile unmöglich, das Betriebspersonal kann keinen Flammbogenwirkungen direkt ausgesetzt sein, richtige Bemessung und Konstruktion der Kapselung vorausgesetzt, ist bei Kurzschlüssen auch kein gefährlicher Druckanstieg im Raum zu erwarten. Gekapselte Anlagen, insbesondere SF_6-Anlagen, dürfen deshalb als bedeutend sicherer gelten als offene. Hingegen ist es schwierig, die Spannungslosigkeit einer Anlage sicher festzustellen. Den Erdungsvorrichtungen fällt deshalb besondere Bedeutung zu.

Hiezu ist eine kritische Bemerkung anzubringen: Es hat sich eingebürgert, die Eingangserder (Erdungsvorrichtung in der Zuleitung zu einer Anlage) als *Schnellerder* auszubilden und an allen übrigen Erdungsstellen in der Anlage *Arbeitserder* anzubrigen. Ist diese Lösung richtig? Man ging offensichtlich von der Annahme aus, dass an den Leitungen öfter gearbeitet werde als an der Schaltanlage, so dass auch öfter Leitungsausschaltungen vorgenommen werden müssen. Da zudem an solchen Schalthandlungen zwei voneinander entfernte Stationen beteiligt sind, steigt natürlich die Wahrscheinlichkeit einer Falschschaltung.

Aus dieser Sicht ist die getroffene Disposition zweifellos richtig. Ein Irrtum oder Versehen ist aber auch ohne Mitwirkung einer Gegenstation möglich. Beispielsweise kann ein Schaltwärter ein anderes als das befohlene Feld der eigenen Anlage ausschalten, oder er betrachtet einen Anlagepol als ausgeschaltet, der aber zum eingeschalteten Nachbarfeld ge-

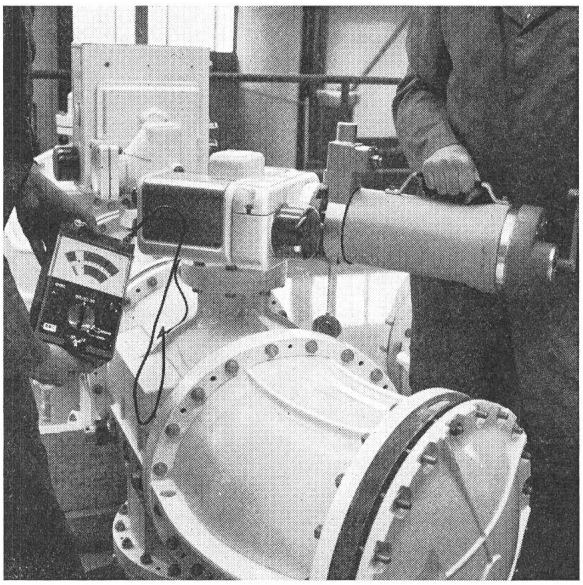

Fig. 7 Arbeitserder mit mobiler Vorrichtung für sprunghafte Einschaltung

hört. Würde unter solchen Umständen vor Ort ein Arbeitserder auf einen unter Spannung stehenden Leiter eingelegt, so wäre wohl ein Kurzschluss-Flammbogen innerhalb der Kapselung unvermeidlich. Es könnte in der Folge zum Ansprechen einer Brechplatte kommen, wobei die in der Nähe befindliche Bedienungsperson durch die austretenden Gase erheblich gefährdet wäre. Man kann sich deshalb fragen, ob es nicht zweckmässig wäre, überall Schnellerder anzubringen oder wenigstens mobile Geräte zum sprunghaften Einlegen der Arbeitserder zu verwenden (vgl. Fig. 6 und 7). Eine Personengefährdung wird natürlich auch dadurch verringert, dass Arbeitserder mit ferngesteuertem Motorantrieb verwendet und Verriegelungen mit den Schaltern vorgenommen werden. Oft vermögen aber auch Verriegelungen nicht alle Schaltfehler-Möglichkeiten auszuschliessen. Die Arbeitsstellensicherung ist deshalb sorgfältig vorzubereiten.

Fehlmanipulationen sind auch beim notwendigen Ausbau einzelner Anlageteile möglich. Da die Schottungsstellen von aussen nicht ersichtlich sind, könnte versehentlich ein gasgefüllter Raum geöffnet werden. Das dabei austretende SF_6-Gas wäre an und für sich nicht besonders gefährlich, doch könnte, sofern der betreffende Abschnitt unter Spannung steht, ein Überschlag auftreten. Allerdings ist auch diese Wahrscheinlichkeit nicht sehr gross, weil ja die Betriebsspannung, selbst bei sehr grossem Gasverlust, noch gehalten wird. Dennoch scheinen sich schon Betreiber über solche Vorfälle Gedanken gemacht zu haben. Beispielsweise sind an den SF_6-Anlagen der BEWAG, Berlin, die Schottungsstellen auf der Anlage-Aussenseite durch auffällige gelbe Trennlinien gekennzeichnet.

Nach den von Herstellern und Betreibern erhältlichen Angaben haben sich die gekapselten SF_6-Anlagen weltweit sowohl betriebs- als auch sicherheitstechnisch gut bewährt. Störungen und Erdschlüsse sollen sehr selten vorgekommen sein. Unfälle sind bis anhin keine bekannt geworden. Dennoch sollten die Gefahren nicht allzusehr bagatellisiert werden. Wie bereits dargelegt, erschwert die Kapselung eine Kontrolle des Spannungszustandes. Es bestehen auch noch einzelne Unsicherheiten, die geklärt werden müssen. Nach meiner Ansicht sollten sich die internationalen Organisationen CIGRE und CEI der noch der Lösung harrenden Probleme annehmen und schliesslich ihre Publikationen den neuen Erkenntnissen entsprechend ergänzen. Es liesse sich so eine weitere Vereinheitlichung der Auffassungen über sicherheitstechnische Belange und vielleicht sogar eine Verbilligung der Anlagen erzielen. Mit Rücksicht auf die vielen Vorteile wäre jedenfalls eine Verbreitung der gekapselten Anlagen zu begrüssen.

Literatur

[1] Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques à Haute Tension (CIGRE), Rapport du groupe de travail 06 au Comité d'études No 23: L'incidence des règles de sécurité sur la construction des postes à haute tension (Electra No 19/1971).

[2] Schweizerischer Elektrotechnischer Verein, Dok. Erd. Komm. 75/30–31 vom 31. Mai 1977: Rev. Entwurf Abschn. «Erdungen» mit Erläuterungen, insbesondere Erläuterung zu Art. 4: Erdung von Wandler-Sekundärkreisen, Führung der Mess- und Steuerkreise in einer Freiluftanlage.

[3] CIGRE, Session de 1972, 23–04, rapport présenté au nom du Comité d'Etudes No 23 (Postes): Résumé de l'expérience internationale sur l'installation et exploitation des postes blindés.

[4] *J. Vontobel:* Anwendung von Schwefelhexafluorid (SF_6) im Schaltanlagenbau für Hoch- und Höchstspannungsanlagen (Bulletin SEV/VSE, 1971, Nr. 14).

[5] Commission Electrotechnique Internationale (CEI): Publ. No 517 (1975): Appareillage à haute tension sous enveloppe métallique de tensions nominales égales ou supérieures à 72,5 kV.

[6] CEI, Publ. No 480 (1974): Guide relatif au contrôle de l'hexafluorure de soufre (SF_6) prélevé sur le matériel électrique.

[7] *G. Mauthe* und *G. H. Krieter:* Erdungsschalter in gekapselten, SF_6-isolierten Hochspannungs-Schaltanlagen (Brown- Boveri-Mitteilungen, 1977, Bd. 64, H. 11).

Adresse des Autors

E. Homberger, Oberingenieur, Eidg. Starkstrominspektorat, Postfach, 8034 Zürich.