

**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:** 72 (1981)

**Heft:** 3

**Artikel:** Zur Forschung, Entwicklung und Anwendung des Schwefelhexafluorid-Selbstblasprinzips

**Autor:** Braun, D. / Jakob, R. / Moll, R.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-905068>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 30.01.2025

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

## Elektrotechnik und Elektronik Electrotechnique et électronique



### Zur Forschung, Entwicklung und Anwendung des Schwefelhexafluorid-Selbstblasprinzips

Von D. Braun, R. Jakob und R. Moll

621.316.542.014.31;

*Aufgrund der besonderen physikalischen Eigenschaften von Schwefelhexafluorid ( $SF_6$ ) konnte ein neuartiges Schaltprinzip, das  $SF_6$ -Selbstblasprinzip, entwickelt werden, bei welchem die zur Lichtbogenlöschung benötigte Energie dem Lichtbogen selbst entzogen wird. Dadurch wurde es möglich, einen Mittelspannungsleistungsschalter zu bauen, der sich durch besondere Wartungsarmut und Wirtschaftlichkeit auszeichnet. Die physikalischen Grundlagen des  $SF_6$ -Selbstblasprinzips sowie die Funktionsweise des Selbstblasschalters und dessen Eigenschaften werden beschrieben.*

*En se basant sur les propriétés physiques particulières de l'hexafluorure de soufre ( $SF_6$ ), un nouveau principe de coupure, celui de l'auto-soufflage par  $SF_6$ , a pu être mis au point, l'énergie nécessaire au soufflage de l'arc étant tirée de l'arc lui-même, ce qui a permis de construire un disjoncteur de moyenne tension qui se distingue par un entretien quasi négligeable et sa rentabilité. Les bases physiques du nouveau principe, ainsi que le fonctionnement et les caractéristiques de ce disjoncteur sont décrits.*

#### 1. Einleitung

Der Einsatz von Schwefelhexafluorid ( $SF_6$ ) in Hochspannungsleistungsschaltern hat in den letzten 15 Jahren einen grossen Aufschwung erlebt. Die Kombination von hoher dielektrischer Festigkeit des Gases mit den ausgezeichneten Lichtbogenlöseigenschaften erlaubt die Realisierung von hochwertigen Schaltgeräten mit günstigem Aufwand. Aufgrund der besonderen physikalischen Eigenschaften von  $SF_6$  konnte von Brown Boveri ein neuartiges Schaltprinzip, das  $SF_6$ -Selbstblasprinzip, entwickelt werden, welches den Bau von kompakten Mittelspannungs-Schaltgeräten in ölloser Technik ermöglicht, die sich durch besondere Wirtschaftlichkeit und Wartungsarmut auszeichnen.

In den folgenden Abschnitten werden die physikalischen Grundlagen des  $SF_6$ -Selbstblasprinzips sowie die Funktionsweise der Selbstblaskammer näher erläutert. Weiter wird der Mittelspannungsleistungsschalter Typ HB von Brown Boveri, die technische Realisierung des Selbstblasprinzips, vorgestellt und auf dessen Eigenschaften und die durchgeführten Prüfungen eingegangen.

#### 2. Schwefelhexafluorid ( $SF_6$ ) als Isolier- und Lichtbogenlöschmedium

Die bemerkenswerten Eigenschaften von  $SF_6$  als Isolier- und Lichtbogenlöschmedium sind durch die Struktur des  $SF_6$ -Moleküls und durch die einzigartige Kombination von ther-

mischen und elektrischen Eigenschaften dieses Gases bedingt [1].  $SF_6$  ist ein farbloses, geruchloses, ungiftiges, unbrennbares und aufgrund seines symmetrischen Molekülaufbaues chemisch sehr beständiges Gas.

Die hervorragenden dielektrischen Eigenschaften von  $SF_6$  beruhen auf der Elektronegativität des  $SF_6$ -Moleküls, d.h. auf seiner ausgeprägten Neigung, freie Elektronen zu binden. Durch dieses Verhalten werden die Bedingungen für den Aufbau einer elektrischen Entladung erschwert. Im Vergleich zu Luft hat  $SF_6$  bei gleichem Druck eine etwa 2,5...3mal höhere elektrische Festigkeit. Die gleiche elektrische Festigkeit wie bei Luft wird bei  $SF_6$  somit schon bei wesentlich tieferen Drücken erreicht. Dies bedeutet einfachere und daher billigere Konstruktionen. Weiter sind bei geringerem Druck auch die erforderlichen hohen Dichtigkeiten der Schaltgeräte leichter zu beherrschen.

Die besondere Eignung von  $SF_6$  als Lichtbogenlöschmedium beruht u.a. auf den folgenden Eigenschaften:

- Aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften besitzt  $SF_6$  eine sehr kleine Lichtbogenzeitkonstante, d.h., die Umwandlung von gut leitendem Plasma in eine isolierende Gasstrecke erfolgt innerhalb kürzester Zeit (einige wenige Mikrosekunden).
- Bei der Abkühlung des Lichtbogens rekombinieren die Dissoziationsprodukte des  $SF_6$  praktisch vollständig wieder zu  $SF_6$ .

– Das elektronegative Verhalten von SF<sub>6</sub> und auch von seinen Dissoziationsprodukten führt zu einer sehr raschen Wiederverfestigung der Schaltstrecke unmittelbar nach dem Erlöschen des Lichtbogens.

### 3. Der axial beblasene Schaltlichtbogen

Als effizientester Löschmechanismus hat sich die axiale Bebläsung des Lichtbogens erwiesen [2]. Das Grundprinzip des axial beblasenen Lichtbogens ist in Figur 1 in Form eines sich entleerenden Druckreservoirs dargestellt. Das Druckverhältnis  $p_0/p_e$  wird im allgemeinen so hoch gewählt, dass im Düsenengnis Schallgeschwindigkeit erreicht wird. Nach der

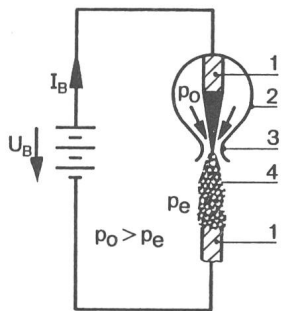


Fig. 1 Grundprinzip des axial beblasenen Lichtbogens in Form eines sich entleerenden Druckreservoirs

- |                              |                 |
|------------------------------|-----------------|
| $p_0$ Druck im Hochdruckteil | 1 Elektrode     |
| $p_e$ Auspuffdruck           | 2 Druckbehälter |
| $I_B$ Lichtbogenstrom        | 3 Düse          |
| $U_B$ treibende Spannung     | 4 Lichtbogen    |

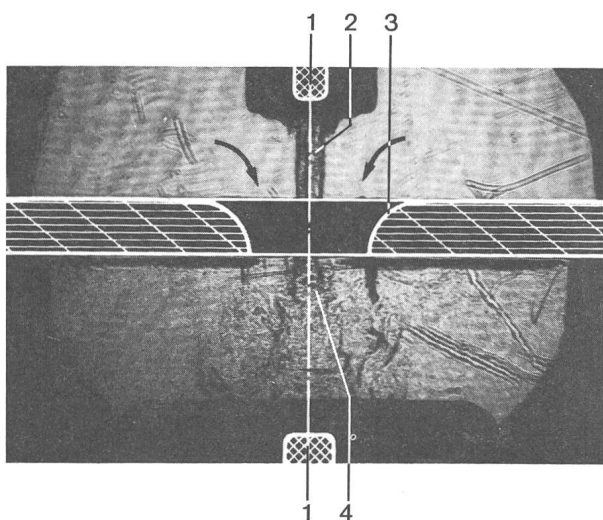


Fig. 2 Schlieren-Einzelbildaufnahme eines axial beblasenen Lichtbogens

Die Düse sowie die Elektroden sind eingezeichnet. Die Strömungsrichtung des Löschgases wird durch die Pfeile angegeben. Deutlich ist das turbulente Strömungsgebiet stromabwärts der Düse zu erkennen

- |   |
|---|
| 1 Elektrode                                 |
| 2 Lichtbogen im laminaren Strömungsgebiet   |
| 3 Düse                                      |
| 4 Lichtbogen im turbulenten Strömungsgebiet |

Düse bildet sich ein expandierender Überschall-Freistrahls aus. Der Lichtbogen brennt in der Achse dieses Strömungsfeldes und weist zwei unterschiedliche Bereiche auf: einen laminaren Bogenteil im Hochdruckreservoir und einen turbulenten Teil stromabwärts der Düse. Diese Verhältnisse sind in Figur 2 deutlich erkennbar.

Das Gas in der Strömungsachse wird durch den Lichtbogen sehr stark erhitzt ( $T \approx 20000$  K) und besitzt eine rund tausendmal niedrigere Dichte als das umgebende kalte Löschgase. Das leichte Lichtbogenplasma wird daher durch den gegebenen Druckgradienten sehr stark beschleunigt.

Die Turbulenz entsteht durch die Scherwirkung zwischen dem mit Schallgeschwindigkeit (Schallgeschwindigkeit von SF<sub>6</sub> bei 300 K: 137 m/s) ausströmenden kalten Löschgase und dem Lichtbogenplasma, das eine Geschwindigkeit von einigen 1000 m/s aufweist. In der Nähe eines Stromnulldurchganges erweist sich diese Turbulenz als ein sehr wirksames Mittel, um dem noch einige  $1/10$  mm dicken Plasmafaden Energie zu entziehen, ihn also zu kühlen. Dabei steigt der Widerstand des Lichtbogenplasmas in kürzester Zeit sehr stark an, was zur Unterbrechung des Stromes in der Schaltstrecke führt [2]. Die Wirkung der turbulenten Durchmischung kann sehr gut auf einer zeitaufgelösten Schlierenphotographie erkannt werden (Fig. 3). Nach erfolgter Unterbrechung des Stromes wird die ehemalige Lichtbogenstrecke durch die noch vorhandene intensive Gasströmung weiter abgekühlt, so dass der nun geöffnete Schalter der nach der Stromunterbrechung auftretenden dielektrischen Belastung durch die wiederkehrende Spannung zu widerstehen vermag [3; 4].

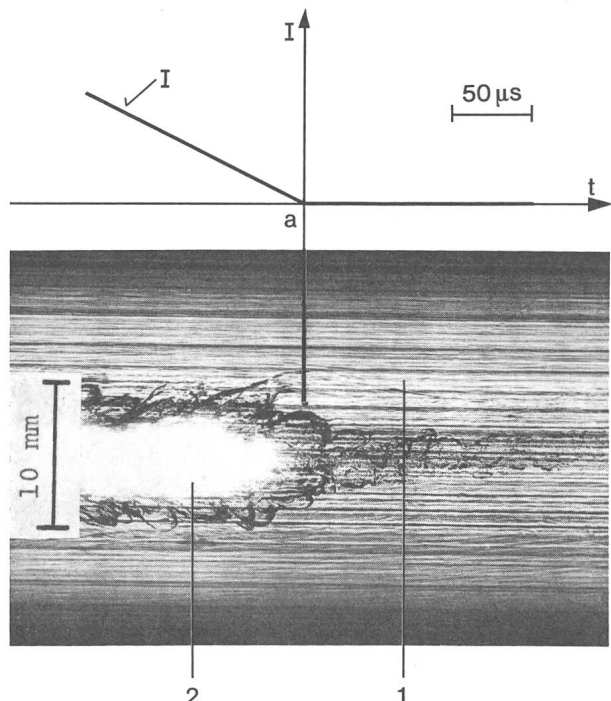


Fig. 3 Zeitlicher Verlauf des Lichtbogens in der Umgebung des Stromnulldurchganges im turbulenten Strömungsgebiet eines axial beblasenen Lichtbogens

Die Durchmischung des heißen Bogenplasmas mit dem kalten Umgebungsgas ist gut erkennbar

- |                        |              |
|------------------------|--------------|
| $I$ Strom              | 1 Kaltgas    |
| $t$ Zeit               | 2 Lichtbogen |
| $a$ Stromnulldurchgang |              |

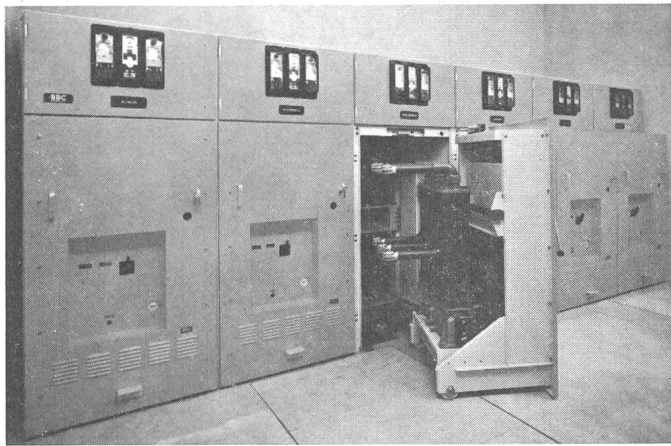


Fig. 4 Erste Anlage mit SF<sub>6</sub>-Selbstblassechalter Typ HB (EW Wettingen, Unterstation Scharthen)

Technische Daten der Leistungsschalter:  
 Nennspannung 24 kV  
 Nennstrom 630 A  
 Nennauschaltleistung 500 MVA

#### 4. Ausführungsformen von SF<sub>6</sub>-Schaltern

Um eine axiale Beblasung realisieren zu können, muss der Lichtbogen in einem Gas mit einem Druckgradienten brennen. Eine erste Schaltergeneration verwendete daher das schon von den Druckluftschaltern her bekannte Zweidruckprinzip, wo ein Hochdruckreservoir über ein sich im Schaltmoment öffnendes Ventil entleert wird, um so die zur Lichtbogenlöschung notwendige Beblasung zu erzeugen. Auf die dauernde Bereitstellung des Löschdruckes konnte bei der Nachfolgeneration, den Kolbenschaltern, verzichtet werden. Dank der niedrigen Schallgeschwindigkeit des SF<sub>6</sub> ist es möglich, den erforderlichen Blasdruck mit einem mit der beweglichen Elektrode verbundenen Kolben zu erzeugen. Allerdings wird dazu ein kräftiger Antrieb benötigt. Die Leistungsfähigkeit der Löschkammern von Kolbenschaltern konnte in den letzten Jahren so stark erhöht werden, dass sich diese zweite Schaltergeneration im Bereich der SF<sub>6</sub>-Hochspannungsleistungsschalter heute allgemein durchgesetzt hat [5].

Es ist nicht erstaunlich, dass dieses erfolgreiche Schaltprinzip auch im Mittelspannungsgebiet zum Einsatz kam, wobei die langjährigen Erfahrungen aus Forschung und Entwicklung der SF<sub>6</sub>-Technologie gezielt eingesetzt werden konnten. So entstanden die Mittelspannungs-Kolbenschalter, die sich wegen ihres grossen Löschvermögens besonders für Anwendungsfälle mit hohen Ausschaltleistungen eignen. Um jedoch die vielfältigen Vorteile des Gasschaltprinzips auch im Bereich kleinerer Ausschaltleistungen ausnützen zu können, musste nach wirtschaftlicheren Lösungen gesucht werden. Ein Hauptkostenpunkt der Kolbenschalter wird durch den Antrieb gebildet, weshalb versucht wurde, die im Lichtbogen umgesetzte Leistung von einigen Megawatt für die Abschaltung nutzbar zu machen, um die Kompressionsleistung nicht mehr mit dem Antrieb aufbringen zu müssen. Dies erwies sich als möglich, und so wurde die dritte Schaltergeneration – die Selbstblassechalter – im Jahre 1977 erfolgreich auf dem Markt eingeführt (Figur 4).

#### 5. Das Selbstblasprinzip

Die erwähnte Tatsache, dass durch eine axiale Beblasung des Lichtbogens eine bessere Löschwirkung erzielt werden

kann, hat zu einer Anordnung der Schaltkammer wie in Figur 5 dargestellt geführt. Die mit SF<sub>6</sub>-Gas gefüllte Schaltkammer ist in einen Druckraum 9 und einen mehrfach grösseren Auspuffraum 11 unterteilt.

Beim Selbstblassechalter wird der Blasdruck zur Hauptsache durch die Ausdehnung von aufgeheiztem Gas erzeugt. Bei einer Ausschalthandlung wird zunächst ein Lichtbogen zwischen den Leistungsfingerkontakten 4 und dem beweglichen Kontaktröhre 8 gezogen. Dieser Lichtbogen kommutiert bei der weiteren Bewegung des Kontaktröhres auf die Ringelektrode 6. Der Strom fliesst nun durch die Zylinderspule 3 und erzeugt ein quer zum Lichtbogen gerichtetes Magnetfeld. Infolge der Lorentz-Kraft wird der Lichtbogen in eine schnelle rotierende Bewegung versetzt, wodurch das ruhende Gas im Druckraum 9 in kürzester Zeit wirkungsvoll aufgeheizt wird. Das mehratomige SF<sub>6</sub>-Gas besitzt bei Erwärmung in den Bereich der Dissoziationstemperatur eine grosse Volumenausdehnung und ist deshalb sehr gut zur Druckerzeugung geeignet. Die während des Ausschaltens von Kurzschlußströmen auftretenden Drücke liegen im Bereich der bei Kolbenschaltern üblichen Werte. Das aufgeheizte Gas strömt durch das Kontaktröhre 8 in den Auspuffraum 11 und erzeugt in der Düse 7 die gewünschte axiale Beblasung des Lichtbogens. Neben der eigentlichen Erzeugung des Blasdruckes fördert das Magnetfeld auch das Lichtbogenlöschvermögen. Durch Anfachung einer magnetischen Lichtbogeninstabilität wird eine Turbulenz erzeugt, die für die Lichtbogenkühlung in der Umgebung des Stromnulldurchganges zusätzlich zu der strömungsmechanisch erzeugten Turbulenz wirksam wird. Dank des umlaufenden Lichtbogenfusspunktes ist ausserdem der Abbrand der Kontakte sehr gering.

Durch den Einsatz neuer Methoden der optischen Diagnostik im Lichtbogenbereich neben den üblichen Messungen von Strom, Spannung, Kontaktbewegung und Gasdruck konnte

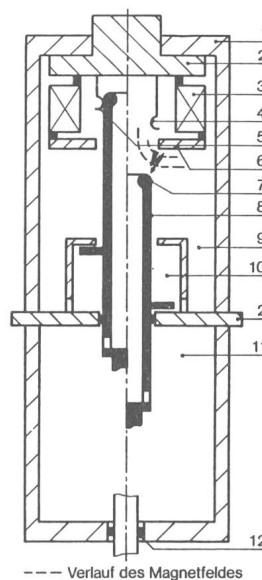


Fig. 5 Prinzipschema der SF<sub>6</sub>-Selbstblaskammer

- |                   |                                |
|-------------------|--------------------------------|
| 1 Löschkammer     | 7 Düse                         |
| 2 Festkontakt     | 8 Beweglicher Kontakt          |
| 3 Zylinderspule   | 9 Druckraum                    |
| 4 Leistungsfinger | 10 Blashilfe                   |
| 5 Nennstromfinger | 11 Auspuffraum                 |
| 6 Ringelektrode   | 12 Abdichtung gegen Atmosphäre |
- Links der Mittellinie geschlossener,  
rechts geöffneter Schalterkontakt

eine für die verschiedensten Ausschaltbedingungen optimale Abstimmung der an der Lichtbogenlöschung beteiligten Parameter erreicht werden [6]. Trommel- und Schnellbild-Kamera-Aufnahmen gaben Aufschluss über den Bogendurchmesser und den Verlauf der Bogenbewegung (Figur 6). Nebst einer optimalen Gestaltung des Druckraumes, damit eine gute Durchmischung des Kaltgases mit dem heissen Bogengas erfolgt und so eine möglichst grosse Gasmenge in den Bereich der Dissoziationstemperatur gebracht wird, ist auch der Verlauf des Magnetfeldes der Zylinderspule von grosser Bedeutung. Die Rotationsgeschwindigkeit des Lichtbogens hängt von der Grösse der magnetischen Induktion und damit vom Ausschaltstrom ab und beträgt bei Kurzschlußströmen einige 100 m/s. Durch den Einbau geeigneter Mittel kann eine Phasenverschiebung zwischen Magnetfeld und Ausschaltstrom erreicht werden. Dadurch wird die Rotation des Plasmafadens im Bereich des Stromnulldurchganges aufrechterhalten und so der durch die axiale Bebläsung ohnehin schnelle Abbau der Restleitfähigkeit des Bogens zusätzlich gefördert. Figur 7 zeigt den qualitativen Verlauf des Stromes und des Magnetfeldes der Zylinderspule bei einer Ausschaltung.

Ein kleiner Kompressionskolben, die Blashilfe 10 (Figur 5) unterstützt den Druckaufbau bei kleinen Strömen bis einige 100 A. Damit ist eine sichere Löschung über den gesamten Ausschaltstrombereich gewährleistet.

Die Gasströmung und somit die Löschintensität ist beim Selbstblasprinzip stromabhängig. Grosse Ströme (Kurzschlußströme) werden intensiv beblasen, kleine Ströme (z. B. kleine induktive Ströme) werden dank einer ausgewogenen Auslegung der Blashilfe sanft beblasen, was sich im Hinblick auf das Überspannungsverhalten sehr günstig auswirkt.

## 6. Der SF<sub>6</sub>-Selbstblasschalter

Der SF<sub>6</sub>-Mittelspannungsleistungsschalter Typ HB von Brown Boveri stellt die technische Realisierung des Selbstblasprinzips dar. Er besteht aus den drei Hauptkomponenten Federkraftspeicherantrieb, Schalterunterteil mit eingebauter mechanischer Übertragung und den giessharzisolierten Löschkammern. Für den Antrieb konnte der bewährte Federkraftspeicherantrieb des ölarmen Schalters Typ SB in vereinfachter und verbesserter Form übernommen werden. Der Aufbau der

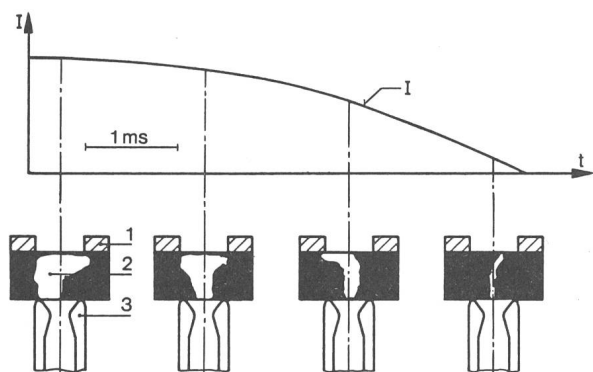


Fig. 6 Schnellbildkamera-Aufnahmen des rotierenden Lichtbogens zu verschiedenen Zeitpunkten während einer Viertelperiode des Stromes

Deutlich ist der rotierende Bogenteil vor der Ringelektrode zu erkennen

- |           |                 |
|-----------|-----------------|
| $I$ Strom | 1 Ringelektrode |
| $t$ Zeit  | 2 Lichtbogen    |
|           | 3 Düse          |

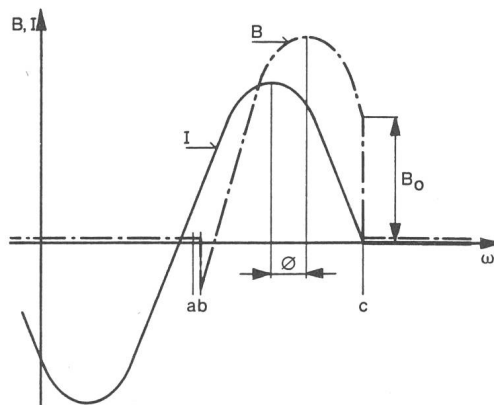


Fig. 7 Qualitativer Verlauf des Stromes und des Magnetfeldes der Zylinderspule bei einer Ausschaltung

- |           |   |
|-----------|---|
| $B$       | Magnetische Induktion                                     |
| $B_0$     | Magnetische Induktion im Zeitpunkt der Stromunterbrechung |
| $I$       | Ausschaltstrom  |
| $\omega$  | Kreisfrequenz   |
| $t$       | Zeit  |
| $\varphi$ | Phasenverschiebung  |
| a         | Kontakttrennung   |
| b         | Kommutierung des Lichtbogens auf die Ringelektrode        |
| c         | Stromunterbrechung  |

Löschkammer entspricht dem in Figur 5 dargestellten Prinzipschema.

Die HB-Typenreihe umfasst Schalter für Nennspannungen bis 36 kV, Nennströme bis 2000 A und Ausschaltströme bis 31,5 kA. Sie beruht auf einem Baukastensystem [7]. Die Löschkammer bleibt beispielsweise bei gegebener Nennspannung und gegebenem Ausschaltvermögen für alle Nennstromstufen identisch. Die Schalter für verschiedene Nennströme unterscheiden sich lediglich durch die Anschlußstücke, welche für die höheren Nennströme mit Kühlrippen versehen sind (Fig. 8). Dies hat unter anderem auch den Vorteil, dass die Leistungsprüfungen und die mechanischen Prüfungen jeweils nur bei einer und nicht bei allen Nennstromstufen durchgeführt werden müssen.

Im Rahmen der Entwicklung des SF<sub>6</sub>-Selbstblasschalters wurde das Verhalten der einzelnen Schaltertypen unter den verschiedensten Betriebsbedingungen umfassend geprüft.

**Ausschalten von Kurzschlußströmen:** Das Ausschaltvermögen der HB-Schalter wurde in internen Hochleistungsprüffeldern und im neutralen Prüflabor der KEMA in Holland entsprechend den einschlägigen IEC-Vorschriften nachgewiesen. Figur 9 zeigt z. B. das Oszillogramm einer Ein-Aus-Schaltung mit 33,4 kA bei 12,0 kV.

Dank der kleinen thermischen Zeitkonstanten des SF<sub>6</sub>-Gases bietet auch ein mehrmaliges, unmittelbar aufeinander folgendes Ausschalten von Kurzschlußströmen keine Probleme für den SF<sub>6</sub>-Selbstblasschalter. So konnte bei der Forschungsgemeinschaft für Hochspannungs- und Hochstromtechnik e. V. (FGH) ein spezieller «Gewitterschaltzyklus» mit einem HB-Schalter erfolgreich geschaltet werden [8; 9].

**Ausschalten von Betriebsströmen:** Das einwandfreie Funktionieren im Betriebsstrombereich wurde durch mehrere tausend Ausschaltungen nachgewiesen. Dank einer optimalen Abstimmung der für den Druckaufbau massgebenden Elemente weist der SF<sub>6</sub>-Selbstblasschalter Typ HB keinen kritischen Strombereich auf.



Motor kW	Spannung kV	Verbindung Schalter-Motor	Drehzahl des Motors	Last des Motors	Strom A	Anzahl Schaltungen	Überspannungsfaktor	
							Maximalwert	Mittelwert
135	6,1	40 m Kabel	Nenndrehzahl	Leerlauf	6,4	15	2,0	1,7
135	6,1	40 m Kabel	Anlauf	-	107,0...144,0	10	1,8	1,5
200	6,8	20 m Kabel	Nenndrehzahl	Leerlauf	10,7	21	2,1	1,6
200	6,8	20 m Kabel	Motor festgebremst	-	155,0	20	1,9	1,6
250	6,6	Sammelschiene	Nenndrehzahl	Nennlast	29,0	6	1,1	1,1
250	6,6	Sammelschiene	Nenndrehzahl	Leerlauf	13,0	10	1,5	1,4
250	6,6	Sammelschiene	Anlauf	-	200,0	10	1,4	1,2
250	6,6	30 m Kabel	Nenndrehzahl	Leerlauf	13,0	5	1,4	1,3
250	6,6	30 m Kabel	Anlauf	-	200,0	5	1,3	1,2
250	6,6	110 m Kabel	Nenndrehzahl	Leerlauf	13,0	5	1,4	1,2
250	6,6	110 m Kabel	Anlauf	-	200,0	5	1,1	1,0
310	6,0	40 m Kabel	Nenndrehzahl	Leerlauf	16,0	15	1,4	1,2
310	6,1	40 m Kabel	Anlauf	-	194,0...293,0	15	1,6	1,4

**Ausschalten von kleinen induktiven Strömen:** Beim Ausschalten von kleinen induktiven Strömen mit einem SF<sub>6</sub>-Selbstblassehalter Typ HB kommt es praktisch zu keinem Abreißen des Stromes und in der Folge nur zu geringen Überspannungen. Da im untersten Strombereich der Druckaufbau hauptsächlich durch die hinsichtlich der Löschartintensität optimal dimensionierte Blashilfe erzeugt wird, resultiert eine sanfte Beblasung des Lichtbogens, welche aber dank den guten Löscheigenschaften von SF<sub>6</sub> für eine sichere Stromunterbrechung sorgt. Infolge der nur sanften Beblasung wird der Strom nicht vor seinem natürlichen Nulldurchgang abgerissen. Das diesbezüglich günstige Verhalten wird weiter noch durch physikalische Eigenschaften des SF<sub>6</sub>-Gases gefördert. Wegen der leichten Ionisierbarkeit des Schwefels bleibt bei der Abkühlung des Lichtbogens die Leitfähigkeit bis zu relativ niedrigen Temperaturen erhalten. Dadurch wird ein Instabilwerden des Lichtbogens und somit ein Stromabriss vor dem Nulldurchgang verhindert [10].

Umfangreiche Versuche haben das vorteilhafte Verhalten des Schalters beim Ausschalten von kleinen induktiven Strömen bestätigt. In Tabelle I sind die Resultate von Motorschalt-

versuchen unter verschiedenen Betriebsbedingungen zusammengefasst [11].

**Schalten von kapazitiven Strömen:** Dank den hervorragenden dielektrischen Eigenschaften von SF<sub>6</sub> werden kapazitive Ströme wieder- und rückzündungsfrei unterbrochen. Auch die hohen Einschaltströme, welche beim Parallelschalten von Kondensatorbatterien auftreten können, bieten keine Schwierigkeiten. Wegen der hohen dielektrischen Festigkeit von SF<sub>6</sub> kommt es nur zu kurzen Vorzündlichtbögen und damit nur zu einem sehr geringen Kontaktverschleiss während des Einschaltvorganges. Ein Aufbau von hohen Drücken und damit eine hohe mechanische Beanspruchung der Schaltkammer, wie dies bei Flüssigkeitsschaltern der Fall ist, tritt beim SF<sub>6</sub>-Selbstblassehalter nicht auf.

**Nennstromtragfähigkeit:** Die Strombahn der HB-Schalter ist thermisch sehr grosszügig ausgelegt, so dass die bei Nennstrom auftretenden Übertemperaturen beträchtlich unter den zulässigen Grenzwerten liegen. Da Nennstromkontakte und Leistungskontakte räumlich voneinander getrennt sind, tritt nach Ausschaltungen keine Verschlechterung der Stromtragfähigkeit ein. Erwärmungsprüfungen nach mehreren hundert

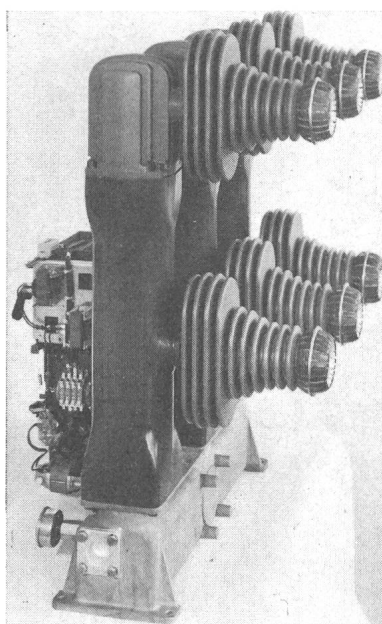


Fig. 8 Baukastensystem beim SF<sub>6</sub>-Selbstblassehalter Typ HB

Der Schalter ist mit Anschlußstücken für einen Nennstrom von 2000 A ausgerüstet

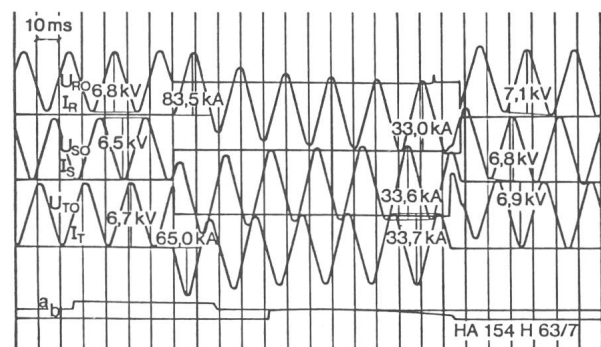


Fig. 9 Oszillogramm einer Ein-Aus-Schaltung mit einem SF<sub>6</sub>-Selbstblassehalter Typ HB

U<sub>R0</sub>, U<sub>S0</sub>, U<sub>T0</sub> Phasenspannungen in den Phasen R, S, T  
 I<sub>R</sub>, I<sub>S</sub>, I<sub>T</sub> Strom in den Phasen R, S, T  
 a Steuerspannung Einschaltspule  
 b Steuerspannung Ausschaltspule

Nennstromausschaltungen bzw. nach zehn vollen Kurzschlussausschaltungen ergaben nur unwesentlich erhöhte Temperaturen gegenüber dem Neuzustand.

**Dielektrische Festigkeit:** Auch beim minimalen Fülldruck konnten die für Nennspannungen bis 36 kV geforderten Stehwechsel- und Stehblitzstoßspannungen mit grosser Sicherheit nachgewiesen werden.

**Mechanische Dauerfestigkeit:** Da vom Antrieb nahezu keine Kompressionsarbeit geleistet werden muss, kleine Kontaktabstände wegen der hohen dielektrischen Festigkeit von SF<sub>6</sub> genügen und das Selbstblasprinzip nur eine geringe Kontaktgeschwindigkeit erfordert, ist die benötigte Antriebsenergie sehr klein. Kleine Antriebsenergie und geringe Kontaktgeschwindigkeit sind aber gleichbedeutend mit einer langen mechanischen Lebensdauer eines Schalters. Durch mechanische Dauerschaltversuche, die an Schaltern aus der Seriefertigung durchgeführt wurden, konnte dies mehrfach bestätigt werden [9].

**Betriebsbezogene Entwicklungsprüfungen:** Neben den Entwicklungs- und Typenprüfungen wurden die Schalter auch einer sog. betriebsbezogenen Entwicklungsprüfung unterzogen [9]. Bei dieser weit über die Anforderungen der IEC-Vorschriften hinausgehenden Prüfung wird die Beanspruchung, die ein Schalter im Betrieb erfährt, in zeitgeraffter Form im Labor nachgebildet. Dazu wird er einer Kombination von mechanischen, elektrischen, thermischen, dielektrischen und klimatischen Beanspruchungen unterworfen. Während der Prüfung werden wichtige Kenngrößen, wie Dichtigkeit, Kontaktgeschwindigkeit, Spannungsabfall über den Kontakten, Spannungsfestigkeit, Teilentladungsverhalten und Isolationswiderstand ständig kontrolliert. Diese Messwerte blieben bei sämtlichen Prüfungen innerhalb der zulässigen Toleranzen. Ausserdem stehen einige HB-Schalter versuchsweise auch als Ofenschalter im Einsatz. Wegen den hohen Schaltzahlen im Ofenbetrieb ist es möglich, innerhalb kurzer Zeit eine grosse Betriebserfahrung zu sammeln. Einer dieser Schalter hat bereits über 10000 Schaltungen ohne jede Revision absolviert. Von diesen Schaltungen waren etwa 67 % Lastschaltungen mit Strömen zwischen 50 und 300 A.

**Anwendung im Betrieb:** Durch die erwähnten, umfangreichen Prüfungen konnte beim SF<sub>6</sub>-Selbstblassechalter Typ HB ein hoher Zuverlässigkeitsstand erreicht werden. Ausserdem ist er ein sehr wartungsarmer Schalter. Neben einer hohen mechanischen Dauerfestigkeit besitzt der Selbstblassechalter, bedingt durch den rotierenden Lichtbogen und den damit verbundenen geringen Kontaktabbrand, auch ein grosses Summenstromausschaltvermögen.

Der Schalter ist aber auch revidierbar und damit kein Wegwerfartikel. Eine Revision ist einfach durchzuführen und macht den Schalter wieder zu einem neuwertigen Apparat. Eine Überprüfung des Zustandes der Kontakte ist mit ein paar Handgriffen sogar innerhalb weniger Minuten möglich.

Die Leckverluste der Schalter betragen weniger als 1% des Gasinhaltes pro Jahr. Der Betriebsdruck sinkt innerhalb eines Zeitraumes von zehn Jahren nicht unter den minimalen Fülldruck ab, bei welchem noch sämtliche Schalterfunktionen garantiert werden. Er kann im übrigen jederzeit an einem Manometer abgelesen werden.

All diese Gegebenheiten geben dem Betreiber die Sicherheit, jederzeit ein funktionstüchtiges Gerät in Betrieb zu haben.

Die HB-Schalter können in verschiedenen Ausführungen

für freie Aufstellung sowie für gekapselte und geschottete Schaltfelder geliefert werden [12]. Beim Einsatz in Schaltanlagen von Energieverteilungsnetzen wird dank dem hohen Summenstromausschaltvermögen unter normalen Bedingungen während mindestens 20 Jahren kein Kontaktwechsel erforderlich sein. Besonders vorteilhaft für den Einsatz in Freileitungsnetzen ist die Fähigkeit des SF<sub>6</sub>-Selbstblassechalters, den Kurzunterbrechungs-Zyklus nach IEC sowie spezielle Gewitterschaltzyklen ohne Reduktion der Ausschaltleistung ausführen zu können. Wie bereits ausgeführt, ist der SF<sub>6</sub>-Selbstblassechalter Typ HB wegen seinen sehr geringen Überspannungen auch speziell gut für das Schalten von kleinen induktiven Strömen und insbesondere für das Schalten von Hochspannungsmotoren in Industrieanlagen und Kraftwerkshilfsbetrieben geeignet. Beim Einsatz von HB-Schaltern kann in einem solchen Fall im Gegensatz zu anderen Schaltprinzipien auf Überspannungsableiter verzichtet werden.

## 7. Ausblick

Mit dem Selbstblasprinzip ist es gelungen, einen Gasschalter zu bauen, welcher die zur Lichtbogenlöschung benötigte Energie dem Lichtbogen selbst entzieht. Die sich daraus ergebenden Vorteile und die Vorzüge, welche die Verwendung von SF<sub>6</sub> als Lichtbogenlöschmedium mit sich bringen, ermöglichen es, einen Mittelspannungsleistungsschalter auf den Markt zu bringen, der sich durch besondere Betriebssicherheit, Zuverlässigkeit, Wartungsarmut und Wirtschaftlichkeit auszeichnet.

Die vergangenen vier Jahre haben gezeigt, dass der Selbstblassechalter die hohen Erwartungen, die in dieses neue, zukunftsweisende Schaltprinzip gesetzt wurden, vollumfänglich zu erfüllen vermag. Insbesondere hat sich der HB-Schalter auch an verschiedenen Orten zur vollen Zufriedenheit der Betreiber bewährt, wo vorher mit anderen Schaltprinzipien Störungen infolge von Überspannungen oder Schaltversager während Gewittern aufgetreten waren.

## Literatur

- [1] A. Eidinger: Die Anwendung von SF<sub>6</sub> im Anlagen- und Schalterbau. Bull. SEV/VSE 69(1978)22, S. 1202...1206.
- [2] W. Hermann a.o.: Investigation on the physical phenomena around current zero in HV gas blast breakers. IEEE Trans. PAS 95(1976)4, p. 1165...1176.
- [3] R. Moll and E. Schade: Investigation of the dielectric recovery of SF<sub>6</sub>—blown high voltage arcs. Third International Symposium on High Voltage Engineering, Milan, September 1979.
- [4] R. Moll and E. Schade: Dielectric recovery of axially blown SF<sub>6</sub>-arcs. Sixth International Conference on Gas Discharges and their Applications, Edinburgh, 8th...11th September 1980. IEEE Conference Publication 189(1980).
- [5] E. Slamecka: SF<sub>6</sub>-Hochspannungs-Leistungsschalter: Stand der Technik. ETZ 101(1980)2, S. 80...83.
- [6] W. Hermann und K. Ragaller: Entwicklungsversuche für Leistungsschalter. Brown Boveri Mitt. 66(1979)4, S. 281...287.
- [7] R. Schaumann, R. Jakob und E. Schade: SF<sub>6</sub>-Mittelspannungsschalter Typ H. Brown Boveri Mitt. 67(1980)4, S. 251...256.
- [8] A. Ganz und O. Honz: Schaltprobleme in 20-kV-Netzen und eine mögliche Lösung. Bull. SEV/VSE 70(1979)9, S. 445...448.
- [9] M. Cancio, K. Jaun und H. Orgler: Betriebsbezogene Entwicklungsprüfungen von SF<sub>6</sub>-Schaltern für die Mittelspannung 7,2 bis 36 kV. Brown Boveri Mitt. 66(1979)11, S. 715...721.
- [10] A. Erk und M. Schmelzle: Grundlagen der Schaltgerätetechnik. Kontaktglieder und Löscheinrichtungen elektrischer Schaltgeräte der Energietechnik. Berlin/Heidelberg, Springer Verlag, 1974.
- [11] A. Ganz und R. Jakob: Das Schalten von Hochspannungsmotoren mit SF<sub>6</sub>-Selbstblassechalter. Brown Boveri Mitt. 66(1979)11, S. 710...714.
- [12] K. Munzinger, D. Poole und G. Maier: Eine neue Einheitsreihe von Mittelspannungs-Schaltfeldern für ölarme und SF<sub>6</sub>-Schaltgeräte. Brown Boveri Mitt. 64(1977)11, S. 634...639.

## Adresse der Autoren

Dieter Braun, dipl. Ing. ETH (Abt. AMT), Richard Jakob, dipl. Ing. ETH (Abt. AMV) und Rudolf Moll, dipl. Ing. ETH (Abt. KLR), BBC Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie, 5401 Baden.