**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:** 71 (1980)

**Heft:** 21

**Artikel:** Untersuchungen an doppelt axialen luftbeblasenen Schaltlichtbögen

**Autor:** Sturzenegger, C. / Reinhardt, R. / Schötzau, H. J.

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-905303

**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**

# Untersuchungen an doppelt axialen luftbeblasenen Schaltlichtbögen

Von Ch. Sturzenegger, R. Reinhardt und H. J. Schötzau

621.3.014.31

*Der doppelt axiale, luftbeblasene Schaltlichtbogen wird mit verschiedenen Diagnostikmethoden untersucht. Resultate, mit Schnellbildphotographie, Laserschlieren-Optik und Sondenmessungen im Lichtbogen erhalten, werden diskutiert. Diese Methoden geben Einblick in die Wechselwirkung zwischen Lichtbogen und Gasströmung. Die Resultate sind im wesentlichen auf $SF_6$-beblasene Schaltlichtbögen übertragbar.*

*L'arc de rupture soufflé par un double écoulement axial d'air est analysé à l'aide de différentes méthodes diagnostiques. La luminescence de l'arc est enregistrée par une caméra à séquences rapides tandis que l'écoulement du gaz stabilisant l'arc est examiné par strioscopie à rayons laser. Des sondes de mesure permettent de définir le champ électrique. Ces méthodes permettent d'observer l'influence réciproque de l'arc et de l'écoulement du gaz. Les résultats obtenus sont transmissibles, dans leur essence, à des arcs soufflés par du $SF_6$.*

## 1. Einleitung

Im Gasschalter wird der bei der Unterbrechung von Kurzschlußströmen entstehende Lichtbogen mit Hilfe einer intensiven Gasströmung stabilisiert und gleichzeitig gekühlt. Die Kühlprozesse erniedrigen die Temperatur und die Leitfähigkeit der Plasmasäule während einem Stromnulldurchgang genügend, um den weiteren Stromfluss zu unterbrechen und die wiederkehrende Spannung zu halten.

Gezielte Experimente am Schaltlichtbogen sind für die weitere Entwicklung der Leistungsschalter unerlässlich. Moderne Messmethoden ermöglichen die Untersuchung der komplexen physikalischen Vorgänge während des Löschvorganges weitgehend. In einer Versuchsanordnung wird der stabilisierte Bogen mit ausgewählten diagnostischen Methoden experimentell untersucht.

## 2. Messanordnung

Die Informationsbeschaffung bei Kurzschlussversuchen zur Analyse des Schaltvorganges geschieht an speziell entwickelten Versuchsmodellen. Ihr konstruktiver Aufbau gewährleistet eine gute Anpassung an die verschiedenen physikalischen Experimente. Dies gilt vor allem für Systeme, die mit Luft als Löschmedium arbeiten.

### *2.1 Zweidrucksystem*

Das Zweidrucksystem (Fig. 1) besteht aus einem Reservoir R von 40 Litern, das Luft bis zu einem Fülldruck $p_0 = 10$ bar enthält, und der Löschanordnung. Das Löschgas wird, kontrolliert durch ein Ventil V, der Düsenanordnung zugeführt. Das doppelt axiale Löschsystem, elektrisch durch die Isolierzuführung Iz vom Reservoir R getrennt, ist symmetrisch aufgebaut. Bedingt durch den grossen Querschnitt der Zuführung erreicht der Druck im Volumen SV annähernd den Fülldruck $p_0$. Bei genügend grossen Druckverhältnissen $p_0/p_u \leqq 2$ wird das Gas nach den Düsenengstellen in Richtung der Kontakte Kt auf Überschallgeschwindigkeit beschleunigt.

Der Lichtbogen brennt zwischen den beiden feststehenden Kontakten Kt, stabilisiert durch die Strömung. Der Bogen wird zu Beginn eines Versuches mit Hilfe eines feinen Zünddrahtes gezündet. Mit steigendem Strom explodiert dieser und hinterlässt eine Plasmasäule. Die Düsengeometrien sind in Figur 2 dargestellt. Die unterschiedlichen Formen wurden auf Grund von Strömungseigenschaften ausgewählt.

Die Düse mit dem Öffnungswinkel $\Phi = 15^0$ zeigt unter einem bestimmten Druckverhältnis $p_0/p_u$ einen ausgeprägten Verdichtungsstoss zwischen den Düsenenden und den Kontakten. Das mit Überschallgeschwindigkeit strömende Gas verdichtet sich im Stoss plötzlich unter Verringerung der Geschwindigkeit und gleichzeitiger Erhöhung der Temperatur und des Druckes. Die Strömungsgeschwindigkeit des Gases liegt nach dem Stoss im Unterschallbereich. Die physikalischen Grössen vor und nach dem Stoss sind exakt definiert [1].

### *2.2 Elektrischer Kreis*

Die Versuchsanordnung ist an einen synthetischen Prüfkreis (Fig. 3) angeschlossen. Das Konzept dieses Prüfkreises beruht auf der Eigenschaft des Lichtbogens, dass der Spannungsabfall über dem Bogen während der Kurzschlussphase sehr klein ist und erst nach dem Unterbrechen des Kurzschlussstromes auf hohe Werte ansteigt. Der 50-Hz-Generatorkreis liefert den grossen Kurzschlußstrom. Kurz vor dem natürlichen Stromnulldurchgang wird der synthetische Kreis mit Hilfe der Funkenstrecke FS hinzugeschaltet, wobei dieser Kreis seinen Stromnulldurchgang erst nach dem Nulldurchgang des 50-Hz-Kreises hat. Der Hilfsschalter HS unterbricht den 50-Hz-Strom, so dass der Synthetikkreis die wichtigen Parameter wie Stromsteilheit und Spannungssteilheit allein definiert.

Alle Daten zur Analyse des Ausschaltvorganges werden mit Lichtleiterübertragungssystemen in eine Messkabine übermittelt und in Transientenrecordern zwischengespeichert. Nach jedem Schaltversuch wird die notwendige Information mit einem Tischrechner weiterverarbeitet, reduziert und auf Platte abgespeichert.

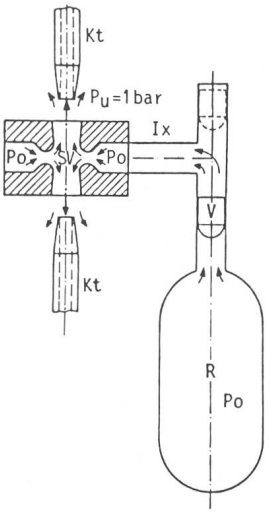


**Fig. 1 Zweidrucksystem**

| | | | |
|---|---|---|---|
| R | Reservoir | SV | Düsenanordnung |
| V | Ventil | Kt | Kontakt |
| Iz | Isolierzuführung | $p_0$ | Fülldruck, $p_u$ Druck am Düsenende |

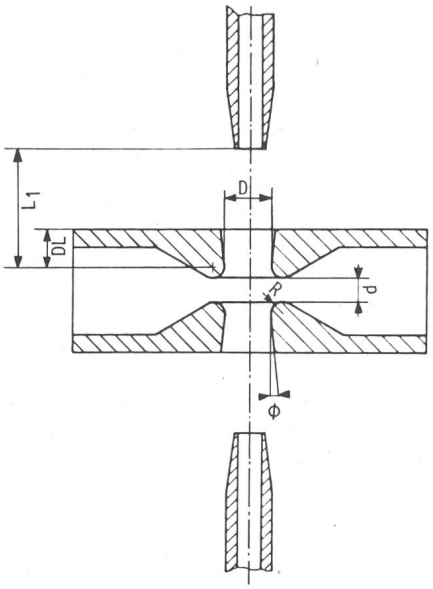


**Fig. 2 Düsengeometrie**

| Nr. | $D$ | $\Phi$ | $DL$ | $R$ | $d$ | $L$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 16 | 2° | 14 | 6 | 5 | 23 |
| 2 | 16 | 15° | 6 | 6 | 8 | 31 |
| 3 | 16 | 15° | 6 | 6 | 8 | 41 |
| 4 | 16 | 2° | 14 | 6 | 5 | 27 |

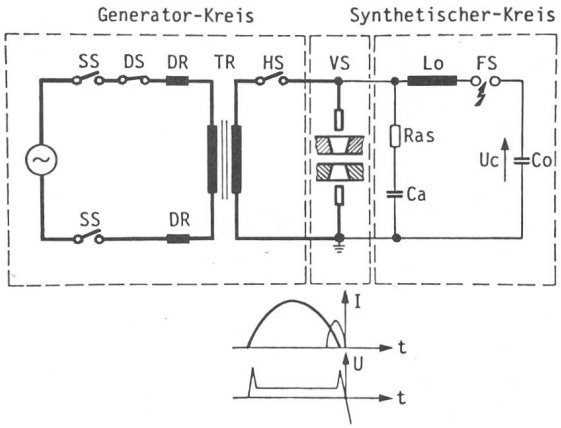


**Fig. 3 Prüfkreis**

SS Schutzschalter
DS Draufschalter
DR Drosseln
TR Transformator
HS Hilfsschalter
VS Versuchsschalter (Prüfling)
$R_{as}$ Parallelwiderstand
$C_a$ Parallelkapazität
$L_0$ Induktivität
FS Funkenstrecke
$C_0$ Kapazität
$U_c$ Ladespannung

## 3. Experimente

Die komplexen physikalischen Phänomene und deren Wechselwirkung können nur mit Hilfe von ausgewählten Diagnostikmethoden untersucht werden. Die optische Strahlung der Lichtbogensäule und der heissleuchtenden Umgebung kann mittels Schnellbildkameras fotografiert werden. Zusätzliche Information über das Verhalten der Gasströmung erhält man unter Verwendung von schlierenoptischen Methoden [2; 3].

Von besonderem Interesse sind die elektrischen Grössen des Lichtbogens, wie Bogenstrom und Gesamtspannung. Der integrale Wert der Gesamtbogenspannung gibt jedoch wenig Auskunft über die physikalischen Mechanismen an verschiedenen axialen Positionen im Lichtbogen. Die Grösse des lokalen elektrischen Feldes wird durch die zeitlich und örtlich verschiedenen Prozesse geprägt. Diese kühlen den Bogen intensiv und bestimmen das Löschverhalten eines Schalters.

### *3.1 Schnellbildfotografie*

Mit modernen Schnellbildkameras und Standardfilmen sind Aufnahmen des intensiv leuchtenden Lichtbogens mit Geschwindigkeiten bis ca. 40000 Bilder pro Sekunde möglich. Figur 4 zeigt das Verhalten des Lichtbogens während einer Halbperiode. Durch die intensive axiale Beblasung bleibt der Lichtbogen während der gesamten Stromhalbwelle stabil. Bis zu einem Strom von ca. 2,5 kA strömen die sichtbaren heissen Gase durch die Hohlkontakte ab. Über dieser Stromstärke fliesst ein Teil der heissen Gase ausserhalb der Kontakte ab. Die Strömung dieser heissen Gase folgt der Aussenkontur der Kontakte. Bei abnehmender Stromstärke kann der Effekt in umgekehrter Richtung beobachtet werden.

In Figur 5a wird der Einfluss des Verdichtungsstosses S auf den Lichtbogen gezeigt. Die plötzliche Vergrösserung des

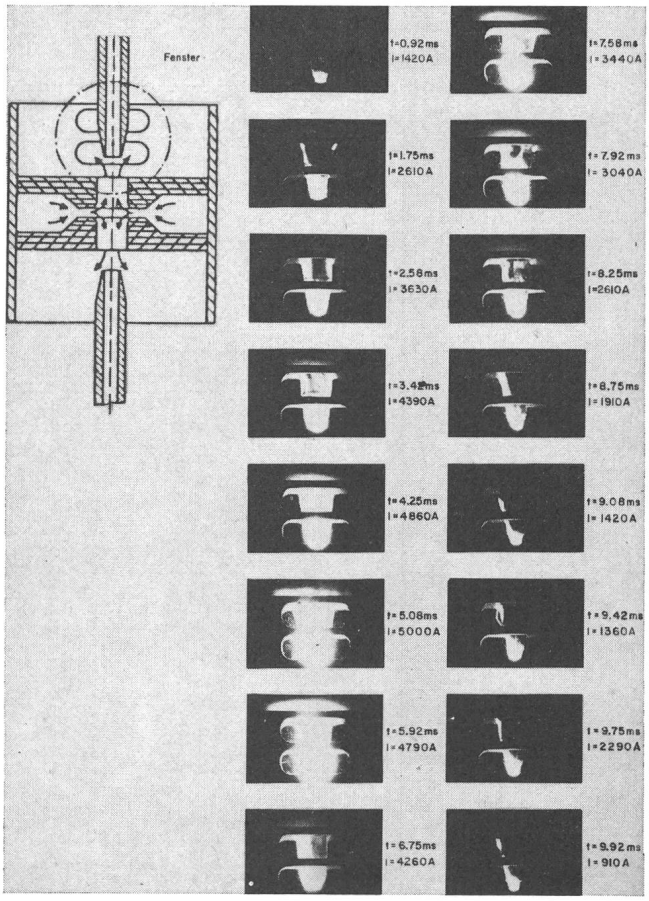


**Fig. 4 Schnellbildaufnahme der sichtbaren Bogenstrahlung**
Aufnahmegeschwindigkeit 6000 Bild/s, Belichtungszeit 9 µs, Düsengeometrie Nr. 1, $p_0/p_u = 8/1$

Lichtbogendurchmessers nach dem Stoss S macht die Verringerung der Kühlwirkung auf den Lichtbogen deutlich. Die Figuren 5b und 5c zeigen eine Aufnahme des zeitlichen Verhaltens des gleichen Lichtbogens mit einer Schmierbildkamera. Bei dieser Technik wird nur ein schmaler Ausschnitt des Lichtbogens auf den schnellbewegten Film abgebildet. Dieser Ausschnitt liegt parallel zur Achse des Lichtbogens.

Die zeitliche Änderung der Position des Verdichtungsstosses S kann in Figur 5b verfolgt werden. Der Ort des Stosses S zeigt eine Stromabhängigkeit. Der Einsatz der Synthetik zur Zeit $t \approx -0{,}6$ ms, verbunden mit einem Stromanstieg, ist deutlich sichtbar. Mit steigendem Strom verschiebt sich die Front in Richtung des Kontaktes Kt. Zusätzlich ist eine schwache Oszillation erkennbar. Eine solche ist in Figur 5c wesentlich ausgeprägter vorhanden. Sie hat eine Frequenz von ca. 14 kHz. Wird der schmale Ausschnitt für die Schmierbildkamera senkrecht zur Bogenachse angeordnet, so kann der zeitliche Verlauf des Bogendurchmessers (an einem definierten Ort zwischen den Kontakten) sowie dessen Abweichung von der Achse festgehalten werden. Figur 5e zeigt eine solche Aufnahme. Wiederum sind Oszillationen zu erkennen, die Auslenkungen des Bogens aus der Achse darstellen. Die Frequenz beträgt bei diesem Experiment 10 kHz. Diese charakteristische Oszillation tritt ebenfalls in der Lichtbogenspannung auf

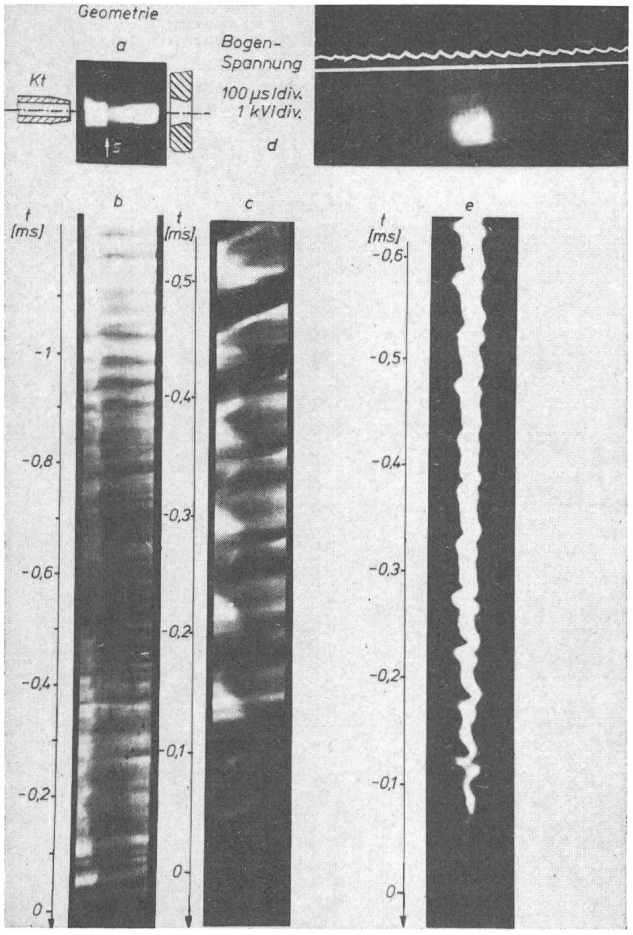


**Fig. 5 Einfluss des Verdichtungsstosses auf den Lichtbogen**

a Kurzzeitaufnahmen des Lichtbogens, S Verdichtungsstoss
b, c Schmieraufnahmen des Lichtbogens, Spalt parallel zur Bogenachse, Düsengeometrie Nr. 2, Druckverhältnis $p_0/p_u = 5/1$
d, e Bogenspannung und Schmieraufnahme, Spalt senkrecht zur Bogenachse, Düsengeometrie Nr. 2, Druckverhältnis $p_0/p_u = 7/1$

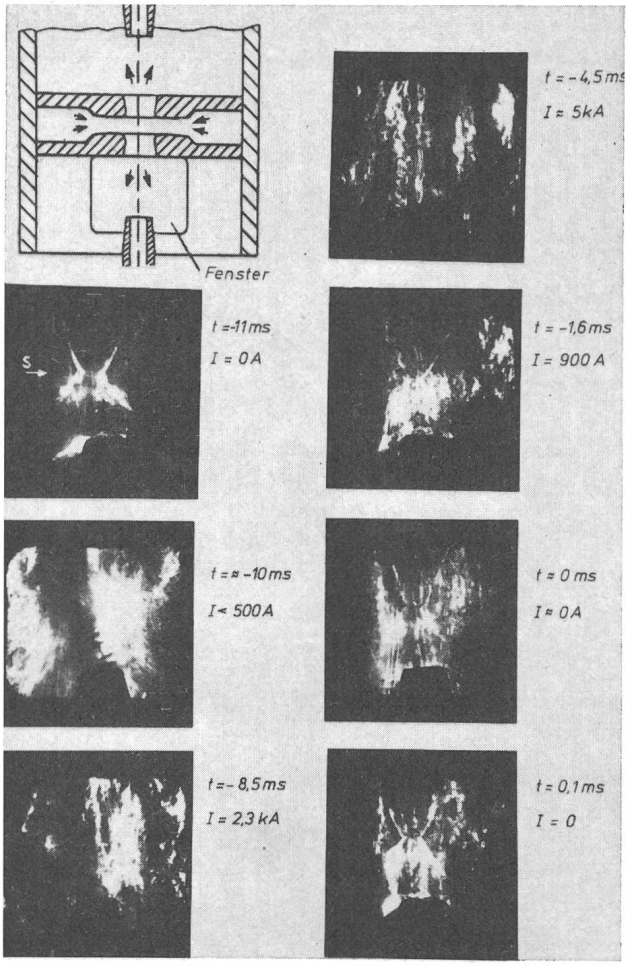


**Fig. 6 Laserschlierenaufnahme**

Aufnahmegeschwindigkeit 6000 Bild/s, Belichtungszeit 9 µs, Düsengeometrie Nr. 3, Druckverhältnis $p_0/p_u = 8/1$

(Fig. 5d). Die bei Verdichtungsstössen und Bogenauslenkungen beobachteten Frequenzen stammen zwar von verschiedenen Versuchen, sind aber von der gleichen Grössenordnung. Beiden ist gemeinsam, dass sie nur bei Stromstärken unter 2,5 kA auftreten. Nach *Howatson* und *Tropham* [5], die Oszillationen in einem einfach axialen System untersuchten, werden diese Instabilitäten in der Grenzschicht zwischen der Kaltgasströmung und dem stärker beschleunigten heissen Gas im Bogenkern erzeugt. Der Einfluss dieser Oszillationen auf das Löschverhalten ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.

### *3.2 Schlierenoptik*

Die schlierenoptischen Methoden geben Auskunft über die Dichteänderung des Löschgases [3; 4] und können für das Sichtbarmachen der Gasströmung ausgenützt werden. Mit einem Laser als Lichtquelle und schmalbandigen optischen Filtern sind trotz intensiv leuchtendem Lichtbogen Untersuchungen von Gasströmungen möglich. Ein typisches Beispiel wird in Figur 6 gezeigt. Die Fotografien wurden während einer Stromhalbwelle mit einer Geschwindigkeit von 6000 Bildern pro Sekunde und einer Belichtungsdauer von 9 µs aufgenommen. Die Bildfolge beginnt 1 ms vor dem Stromeinsatz und zeigt zuerst die Struktur der Strömung ohne Lichtbogen bei $t = -11$ ms bezogen auf den Löschmoment. Der Verdichtungsstoss S sowie der Zünddraht sind gut sichtbar. Nach dem Einsetzen des Stromes bei $t = -10$ ms explodiert der Draht.

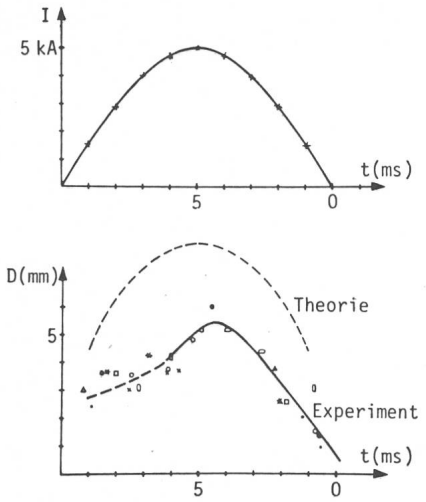


**Fig. 7 Bogenradius aus Laserschlierenaufnahmen mit zugehörigem Strom**
Düsengeometrie Nr. 3, Druckverhältnis $p_0/p_u = 8/1$

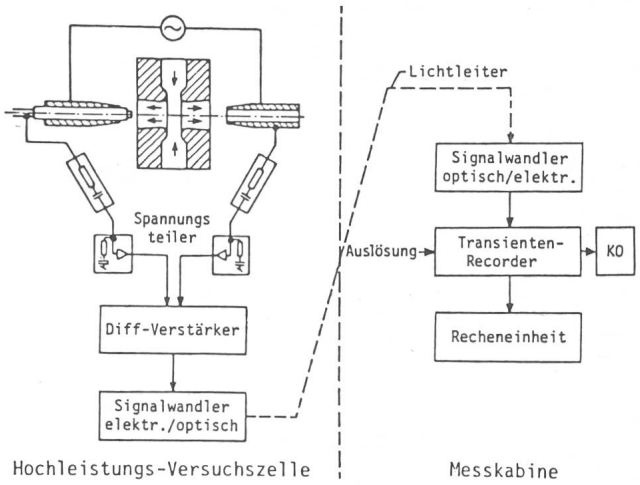


**Fig. 8 Messung des zeitlichen Verlaufes der Bogenspannung und Datenerfassung**

Dabei wird die Strömungsstruktur stark gestört. Zur Zeit $t = -8{,}5$ ms hat sich die Strömung wieder beruhigt. Es ist sowohl der Verdichtungsstoss wie auch der heisse elektrisch leitende Kern der Plasmasäule zu sehen. Nach dem Löschen des Stromes bei $t = 0$ bleibt eine heisse Kernzone sichtbar und ist auch 0,1 ms nach dem Nulldurchgang noch zu erkennen. Der Querschnitt des Bogenkerns (Fig. 6) ist im Vergleich zum Querschnitt des sichtbaren Lichtbogens (Fig. 4) deutlich kleiner.

Aus solchen Aufnahmen kann der Lichtbogendurchmesser bestimmt werden. Figur 7 zeigt eine Auswertung über eine Stromhalbwelle. Zum Vergleich ist die theoretische Kurve [7] für einfach axiale Systeme eingezeichnet. Entsprechende Ergebnisse für doppelt axiale Systeme sind nicht verfügbar. Es ist zu bemerken, dass die theoretische Kurve [7] unter gleichen Bedingungen zu grosse Werte ergibt.

### *3.3 Elektrisches Feld*

Im Hinblick auf die Anwendung im Schalter sind die elektrischen Daten des Bogens im Stromnulldurchgang von grossem Interesse. Insbesondere stellt sich die Frage nach der maximalen transienten Spannungsbelastbarkeit der Löschstrecke nach der Stromunterbrechung in Abhängigkeit von der Stromstärke und den Strömungsparametern des Löschgases.

Durch die Messung des zeitlichen Verlaufs der Bogenspannung an verschiedenen axialen Positionen kann der Verlauf des elektrischen Feldes berechnet werden. Die lokale Bogenspannung wird mit einer teflonisolierten Sonde gemessen (Fig. 8). Die Spannung der sich im Bogen befindenden Sonde und des Gegenkontaktes werden mit gedämpft kapazitiven Spannungsteilern (Zaengl-Teiler) bestimmt; daraus wird mit einem Differentialverstärker ein Mass für die Bogenspannung gebildet. Anschliessend überträgt ein Lichtleiterübertragungssystem das Signal störungsfrei in die Messkabine, wo es in einem Transientenrecorder gespeichert wird. Ein Tischrechner übernimmt die Auswertung, Datenreduktion und Berechnung des elektrischen Feldes. Die Signalbandbreite des Meßsystems beträgt 25 MHz.

Die Experimente zeigen, dass der Verlauf des elektrischen Feldes zwischen den Kontakten im Zeitbereich bis zum Stromnulldurchgang stark von der Strömung geprägt ist [6]. Insbesonders zeichnet sich das Gebiet hinter einem Verdichtungsstoss bis zum Kontakt (vgl. Fig. 5a) durch die Trägheit der Kühlmechanismen aus. Dieses Verhalten ist aus dem zeitlichen Verlauf des elektrischen Feldes ersichtlich.

Eine experimentell bestimmte Feldverteilung einer Löschanordnung ohne Verdichtungsstoss ist in Figur 9 dargestellt. Die Messresultate der verschiedenen Zonen weisen darauf hin, dass der maximale Wert des elektrischen Feldes beim Düsenende liegt (Zone 2). Am gleichen Ort hat der Bogenquerschnitt

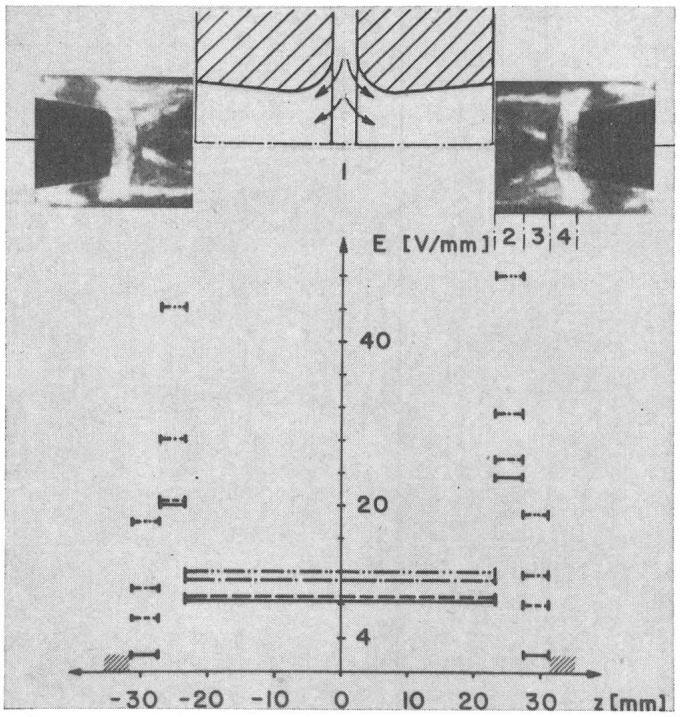


**Fig. 9 Gemessene elektrische Feldverteilung im Lichtbogen in den Zonen 1, 2, 3 und 4**
——— 40 µs vor dem Stromnulldurchgang
— — — 20 µs vor dem Stromnulldurchgang
—·— 10 µs vor dem Stromnulldurchgang
—··— 5 µs vor dem Stromnulldurchgang
Kaltgasströmung der Düsengeometrie Nr. 4 bei einem Druckverhältnis $p_0/p_u = 8/1$

das Minimum [7]. Wird in der Düsengeometrie der Öffnungswinkel $\Phi$ vergrössert, so verschiebt sich das Maximum des E-Feldes in Richtung der Düsenengstelle. Dieses Verhalten stimmt mit früheren Messungen an einfach axialen Systemen überein [6].

## 4. Zusammenfassung

Die modernen Diagnostikmethoden fördern das Verständnis der physikalischen Phänomene im Schaltlichtbogen und unterstützen die Entwicklung von Leistungsschaltern. Nebst den gemessenen integralen elektrischen Bogendaten (wie Bogenspannung, -strom) sind optische Untersuchungen des Lichtbogens und der Gasströmung notwendig, um deren Wechselwirkung zu verstehen.

Die Hochgeschwindigkeitsfotografie zeigt, dass die Bogenstruktur stark durch die Gasströmung geprägt wird. Die zeitliche Entwicklung des Bogenradius kann mit einer Laserschlierenoptik während des Stromflusses verfolgt werden. Aus den Aufnahmen ist ersichtlich, dass auch nach der Stromunterbrechung ein heisser Kanal über eine gewisse Zeit noch vorhanden ist. Die Temperatur und die damit gekoppelte elektrische Leitfähigkeit des Restkanals beeinflussen die nach dem Stromnulldurchgang maximal zulässige Spannungsbeanspruchung der Schaltstrecke wesentlich. Die Bestimmung des elektrischen Feldes im Bogen gibt Hinweise über die elektrische Spannungsbelastbarkeit der einzelnen Zonen. Der Verlauf des elektrischen Feldes wird durch die Strömungsparameter beeinflusst (Drücke, Geometrie).

Die diskutierten Resultate mit Luft sind übertragbar auf $SF_6$-Löschsysteme [vgl. 8]. Insbesondere sind die physikalischen Grössen vor und nach dem Stoss unter angepassten experimentellen Bedingungen ähnlich.

### Literatur


[1] *E. Truckenbrodt:* Strömungsmechanik; Grundlagen und technische Anwendungen. Berlin/Heidelberg, Julius Springer Verlag, 1968.

[2] *M. R. Barrault* and *G. R. Jones:* Practical arcing environments, arc plasma diagnostics. Proceedings of the Yugoslav symposium and summer school on the physics of ionized gases 7(1974), p. 701...808.

[3] *J. Mentel:* Schliereninterferometric investigations of the gas flow occurring in high-voltage $SF_6$ switchgear. Siemens Forsch. Entw. Ber. 4(1975)6, S. 380...388.

[4] *H. J. Schötzau* und *C. Sturzenegger:* Physikalische Grundlagen für die Entwicklung von $SF_6$-Leistungsschaltern. Neues von Sprecher, –(1980)1, S. 4...6.

[5] *A. M. Howatson* and *D. R. Topham:* The instability of electric arcs burning axially in accelerated flow. Journal of Physics D – Applied Physics 9(1976)7, p. 1101...1109.

[6] *C. Sturzenegger, R. Reinhardt* and *H. J. Schötzau:* Influence of a shock wave on the electric field strength distribution in a gas blast interrupter. IEEE Trans. PAS 99(1980)5, p. 1957...1963.

[7] *D. T. Tuma* and *J. J. Lowke:* Prediction of properties of arcs stabilized by forced convection. Journal of Applied Physics 46(1975)8, p. 3361...3367.

[8] *D. M. Benenson* a.o.: Fundamental investigation of arc interruption in gas flows. EPRI-EL 1455, project 246-2, final report. Palo Alto/California, Electric Power Research Institute, july 1980.


### Adresse der Autoren


*Ch. Sturzenegger, R. Reinhardt* und *H. J. Schötzau,* Sprecher+Schuh AG, Physiklabor, 5001 Aarau.