

ÜBER DIE AUFTEILUNG DES ELEKTRISCHEN LICHTBOGENS IN LÖSCHBLECHKAMMERN

Von

S. DOMONKOS

Lehrstuhl für Hochspannungstechnik und Elektrische Apparate,
Technische Universität, Budapest

(Eingegangen am 2. Dezember, 1966)

Vorgelegt von Prof. Dr. J. EISLER

Die häufigste Art der Lichtbogenlöschung an modernen Niederspannungs-Schaltgeräten ist die Aufteilung des Lichtbogens mit Hilfe von Löschblechen. In den Löschblechkammern sind die Bleche senkrecht zur Achse der Bogensäule eingebaut. Die Bezeichnung Löschblechkammer stammt daher, daß die Bleche dank ihrer guten Kühlwirkung bei Wechselstrom die Zahl der Ladungsträger der glühenden Gassäule nach dem Stromnulldurchgang wesentlich herabsetzen. Bei Wechselstrom lassen die in Reihen geschalteten kurzen Elektrodenstrecken die Wiederezündspannung wesentlich ansteigen.

Die Anwendung von Löschblechkammern ist auch bei Gleichstrom vorteilhaft, da hierbei die für die Lichtbogenlöschung erforderliche hohe Bogen- spannung in einer Löschkammer kleinen Ausmaßes erzeugt werden kann. Die Zahl der Anoden- und Kathodenfälle der in Reihen geschalteten Teillichtbögen entspricht der Zahl der entstehenden Teillichtbögen.

Mit der Berechnung der Lichtbogenlöschung bei Gleich- und Wechselstrom haben sich mehrere Autoren befaßt [1, 2]; alle Berechnungsarten setzen jedoch voraus, daß sich der Lichtbogen in mehrere selbständige Teillichtbögen aufspaltet.

Zwischen den voneinander sich trennenden Kontakten bildet sich dagegen ein einziger Lichtbogen aus, der sich auf Grund der auf ihn wirkenden elektrodynamischen Kräfte in Richtung der Löschbleche bewegt. Somit ist die Aufteilung des ursprünglich aus einem Teil bestehenden Lichtbogens in mehrere Teillichtbögen eines der wesentlichsten Momente der Funktion der Löschblechkammern. Der auf die Löschbleche auftreffende Lichtbogen spaltet sich nämlich nur dann, wenn die auf ihn einwirkende Kraft den für die Aufspaltung erforderlichen Wert erreicht. Hierbei haben die Form und Dicke der Löschbleche, die Spalte zwischen den Blechen sowie die Stärke des im Lichtbogen fließenden Stromes einen entscheidenden Einfluß.

In ungünstigen Fällen kann es zu einem Verharren des Lichtbogens an den Löschblechunterkanten kommen, wobei er die Löschbleche und die Kontakte anbrennen und beschädigen kann. Die Wirksamkeit der Löschblechkammern hängt also davon ab, ob der Lichtbogen zwischen die Löschbleche

gelangt. Daraus ist ersichtlich, daß die Untersuchung der Aufteilung des elektrischen Lichtbogens in Einzellichtbögen die richtige Ausgestaltung der Löschblechkammern fördert. Aus dieser Überlegung heraus haben BRON [1] und BURKHARDT [3], [4], [5] grundlegend wichtige Messungen durchgeführt. Wegen der Kompliziertheit der Erscheinungen haben sie die Aufteilung des Lichtbogens an vereinfachten Anordnungen untersucht.

Diese Untersuchungen wurden vom Verfasser mit einer Versuchsanordnung fortgesetzt, die der Praxis um einen Schritt näher kommen. Diese Forschungsarbeit wurde im Auftrage des GANZ Schalter- und Gerätewerkes zusammen mit Untersuchungen anderer Erscheinungen der Löschblechkammer (auf den Lichtbogen wirkende Kräfte, Lichtbogenlöschungsfähigkeit) durchgeführt.

1. Überblick der Literatur

Nach der allgemein akzeptierten Berechnungsart wird die Bewegung des elektrischen Lichtbogens durch die aus dem eigenen Magnetfeld der Elektroden stammende Eigenbelastung [6], durch die Anziehungskraft [7, 8] der Eisenlöschbleche als Antriebskraft und durch die Luftreibung der als zylindrisch gedachten Bogensäule als Widerstand bestimmt.

Nach BRON verlangsamt sich der zwischen den Kontakten entstehende Lichtbogen beim Erreichen der Löschblechunterkanten stark, bzw. er bleibt dort ganz stehen, da sich der Bewegung des Lichtbogens gegenüber ein wachsender aerodynamischer Widerstand geltend macht. Nach seiner Ansicht bedarf es zur Verformung der Bogensäule keiner Kraft, wenn die Verformung langsam vor sich geht und sich dem Eindringen des Lichtbogens zwischen die Löschbleche keine statischen Widerstandskräfte entgegenzusetzen.

Die Bewegung des elektrischen Lichtbogens verfolgte er mit Zeitlupenaufnahmen, nach deren Auswertung er die in *Abb. 1* dargestellten Diagramme erhielt. Der Lichtbogen kam nach Schmelzen eines Kupferfadens 1 cm unterhalb der Löschbleche zustande. Er blieb zunächst unter den Kupferlöschblechen eine Zeitlang stehen und bewegte sich dann nach seiner Aufteilung an den Löschblechen weiter. Die Dauer des Verharrens des Lichtbogens unterhalb der Kupferlöschbleche war von der Stärke des durch eine Spule erzeugten magnetischen Feldes abhängig.

Abb. 2 zeigt die Dauer des Stillstehens bei Löschblechen verschiedener Form. Wie ersichtlich, wurde die kürzeste Zeit bei den mit Einschnitten versehenen Löschblechen beobachtet. Die Werte der *Abb. 1* und *2* stimmen miteinander nicht völlig überein. Die Kurven der *Abb. 2* gelten für den Fall einer Blechdicke von $V = 0,2$ cm sowie für einen Blechabstand von $h = 0,3$ cm. Die *Abb. 1* bezieht sich wahrscheinlich auf kleinere Blechabstände, daher sind dort die Standzeiten länger.

Nach den Meßergebnissen von IGRIZKIJ [9] beträgt die Standzeit des Lichtbogens zwischen 1000 und 30 000 A durchschnittlich 5 ms. Diese Standzeiten wurden an einem Niederspannungs-Leistungsschalter gemessen, in

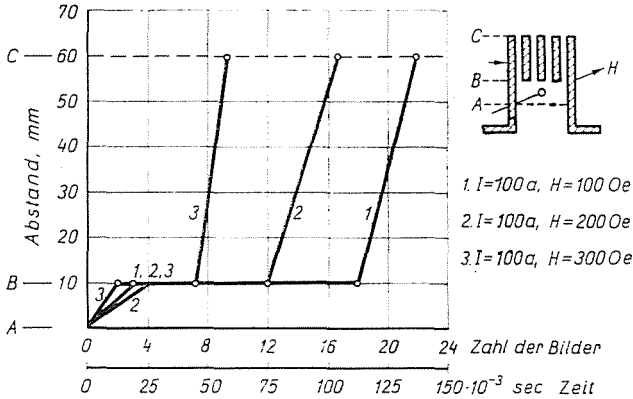


Abb. 1. Darstellung der Lichtbogenbewegung unter und an Löschblechen bei $I = 100\text{ A}$ Gleichstrom und bei unterschiedlichen magnetischen Feldstärken (nach Bron)

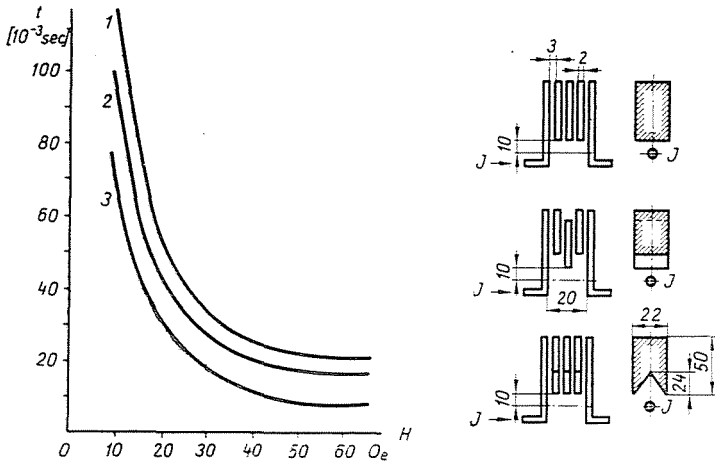


Abb. 2. Darstellung der Aufenthaltsdauer des Lichtbogens unter verschieden geformten Kupferlöschblechen in Abhängigkeit von der magnetischen Feldstärke (nach Bron)

dessen Löschkammer Eisenbleche angeordnet waren. Nach unserer Meinung kann jedoch das plötzliche Anwachsen des aerodynamischen Widerstandes keineswegs einen Stillstand des Lichtbogens, sondern nur eine starke Verzögerung seiner Geschwindigkeit bewirken. Jedenfalls steht fest, daß hier — im Vergleich zur Bogenlöschungszeit der Niederspannungs-Schaltgeräte — von beträchtlichen Zeiten gesprochen werden kann. Sehr bedeutungsvoll sind auch die Untersuchungen BURKHARDTS, die die Ergründung der physikalischen

Eigenschaften der Erscheinung zum Ziele hatten. Sein Ausgangspunkt ist das STEENBECKSCHE Minimumprinzip, nach dem sich der Bogen stets so einstellt, daß seine Brennspannung einen möglichst geringen Wert annimmt.

Die Feldstärke des frei brennenden Bogens beträgt bei einer Stromstärke von etwa 100 A $10\text{--}20 \text{ V/cm}$, der Anoden- und Kathodenfall zusammen $15\text{--}25 \text{ V}$. An einem Bogenabschnitt unter einem Löschblech mit der Dicke $v = 0,2 \text{ cm}$ kann vor der Aufteilung eine Spannung von $2\text{--}4 \text{ V}$ gemessen werden. Nach BURKHARDT spaltet sich der Lichtbogen nur dann auf, wenn die Spannung des

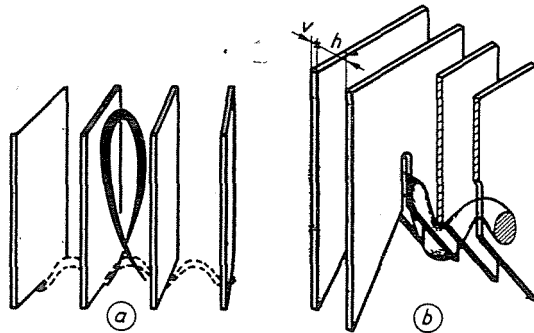


Abb. 3. Schematische Darstellung der Lichtbogenform vor der Aufteilung in der Umgebung des Löschblechpaketes (nach Burkhardt)

Bogenstückes um die Löschbleche $15\text{--}25 \text{ V}$ übersteigt. Die Form des Lichtbogens auf Grund von Beobachtungen zeigt Abb. 3. Das Anwachsen der Spannung von ursprünglich $2\text{--}4 \text{ V}$ auf $15\text{--}25 \text{ V}$ läßt sich auf zweierlei Gründe zurückführen:

a) Der nahe an den gut wärmeleitenden Löschblechen brennende Bogen verengt sich in radialer Richtung, der Wärmeentzug aus der Bogensäule wird größer, die Leitfähigkeit des Plasmas verschlechtert sich, die Feldstärke der Bogensäule nimmt also zu. Diese Wirkung wird durch eine weitere noch gefördert.

b) Es wurde beobachtet, daß sich die frei liegenden Säulenabschnitte des auf die Löschbleche auftreffenden und in radialer Richtung sich verengenden Bogens unter dem Einfluß elektrodynamischer Kräfte in den Raum zwischen zwei Löschbleche hineinwölben, daß also nicht nur die Feldstärke, sondern auch die Länge zunimmt. Die zwischen die Löschbleche eingewölbte Bogensäule bildet eine Schleife; die entstehende Dehnung wird durch den Einfluß der auftretenden Kraft noch gefördert.

Die Stromdichte sowie den Bogen Durchmesser eines frei und unmittelbar in der Nähe der Löschbleche brennenden Lichtbogens zeigt die Abb. 4. Demnach beträgt die Stromdichte eines bei einer Stromstärke von $I = 200 \text{ A}$ frei brennenden Lichtbogens $j = 1,15 \cdot 10^3 \text{ A/cm}^2$ und die eines unmittelbar an den

Stirnflächen der Löschbleche brennenden Bogens $j = 7 \cdot 2 \cdot 10^3 \text{ A/cm}^2$; dies bedeutet, daß die Lichtbogendurchmesser $d = 0,47 \text{ cm}$ und $\bar{d} = 0,19 \text{ cm}$ betragen. Der Durchmesser des Lichtbogens unter dem Löschblech ist also 2,5mal kleiner und somit die Stromdichte 6,25mal größer. Hierzu muß jedoch bemerkt werden, daß ANGELOPOULOS und BRON andere Meßergebnisse erhielten. Beide stellten für den frei brennenden Bogen bei Anwachsen des Stromes auch ein Größerwerden des Bogendurchmessers fest. BURKHARDT erhielt das Maximum des Durchmessers bei ungefähr 80 A, dann sinkt es ab,

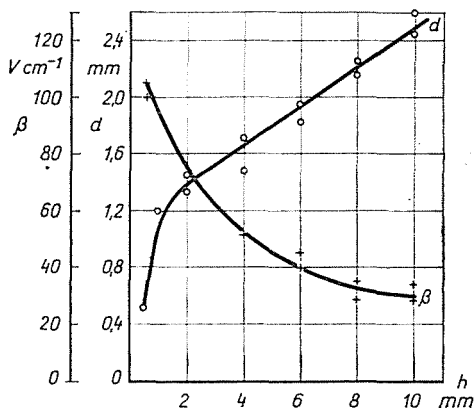


Abb. 4. Lichtbogendurchmesser (d') und Feldstärke β unmittelbar vor der Aufteilung in Abhängigkeit vom Lichtbogenstrom (nach Burkhardt)

und zwischen 150—650 A steigt es um kaum 10% an. Die Stromdichte wurde von ihm unter der Voraussetzung berechnet, daß der Bogenquerschnitt einen Kreis darstellt.

Der Druck in der Lichtbogenachse schreibt sich nach FINKELNBURG—MAECKER zu

$$p = Jj \cdot 10^{-8} \text{ [kp/cm}^2\text{]} .$$

Da der Druck der Stromdichte j proportional ist, ist der Druck in der Lichtbogenachse unterhalb des Löschbleches in dem obenerwähnten Fall 6,25mal größer als in der Achse der ungestörten Säule. Als Folge stellt sich eine Plasmaströmung in Richtung der Lichtbogenachse ein.

Die Bogenfeldstärke bei dem üblichen Löschblechabstand von $h = 0,2 \text{ cm}$ beträgt $E \approx 80 \text{ V/cm}$, d. h. das 4—6fache der frei brennenden Bogensäule.

Den Vorgang der Lichtbogenaufteilung erklärt BURKHARDT folgendermaßen:

Wenn die Spannung des um die Löschbleche gelegenen Bogenabschnittes wegen der angewachsenen Bogenfeldstärke und Bogenlänge die Werte des

Anoden- und Kathodenfalles übersteigt und der Lichtbogen am Löschblech wieder Anoden- und Kathodenfußpunkte bildet, teilt sich der Bogen in zwei, durch Löschbleche voneinander getrennte Teillichtbögen.

Die Richtigkeit dieser Hypothese hat BURKHARDT auch durch Messungen nachgewiesen. Bei der Versuchsanordnung brachte er in die zwischen Molybdänkontakte mit einer Stromstärke von 150 A brennenden Gleichstromlichtbogen zwei 0,2 cm dicke Löschbleche mit einer Geschwindigkeit $v = 56 \text{ cm/s}$ ein. Er stellte hierbei fest, daß die Bogen Spannung vor dem Auftreffen auf die Löschbleche auf 46 V anstieg und dann auf 33 V zurückfiel.

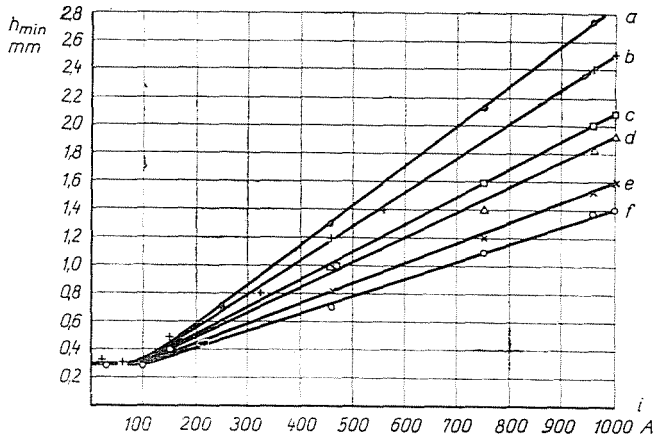


Abb. 5. Mindestabstand der Löschbleche für verschiedene Auftreffgeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Lichtbogenstrom (nach Burkhardt)

Weiterhin sind auch jene Untersuchungen BURKHARDTS von Wichtigkeit, die sich auf die Bestimmung des richtigen Abstandes zwischen den einzelnen Löschblechen beziehen. Wird er zu klein gewählt, werden die Löschbleche durch den Metallschmelzkegel kurzgeschlossen, womit die Löschkammer unbrauchbar wird. Bei zu großem Abstand reicht die Kühlwirkung nicht aus, und die Bogenfeldstärke sinkt ab. Hier müssen zwei Gesichtspunkte in Übereinstimmung gebracht werden.

Bei kleinen Löschblechabständen ist die Bogenfeldstärke groß, die Bogensäule wird jedoch in ihrer Bewegung behindert. BURKHARDT gelangte schließlich zu der Schlußfolgerung, daß der kleinste Abstand zwischen den Blechen dem Durchmesser des durch die Löschbleche abgekühlten Bogens gleich ist.

Abb. 5 zeigt die den verschiedenen Geschwindigkeiten zugehörigen kleinsten Abstände zwischen den Löschblechen in Abhängigkeit von der Stromstärke. Im ersten Moment überrascht es, daß die in Abb. 5 dargestellten Blechabstände wesentlich kleiner sind als der Durchmesser des in Abb. 4 be-

schriebenen blechgekühlten Lichtbogens. In Abb. 4 beträgt der Durchmesser des Bogens $d = 2,8$ mm bei $I = 400$ A und $v = 56$ cm/sec. In Abb. 5 ist für die gleichen Werte $h = 0,9$ mm als kleinster Blechabstand angegeben. Diese Tatsache erklärt BURKHARDT damit, daß sich der Bogen von selbst auf jenen Kreisquerschnitt einstellt, der den kleinsten Wärmeverlust aufweist. Wird der Bogen zwischen die Löschbleche gedrängt, ist das senkrecht auf die Bleche stehende Maß kleiner und das parallel zu den Löschblechen verlaufende Maß größer.

Als Zusammenfassung seiner Erfahrungen in bezug auf die kleinsten Löschblechabstände gab BURKHARDT folgende empirische Beziehung an:

$$h_{\min} = 0,3 + \left[\frac{I}{100} - 1 \right] - [28 - (\ln v)^{3/2}] 10^{-2} [\text{mm}].$$

Hierin ist für v die Auftreffgeschwindigkeit in cm/sec einzusetzen. Die oben erwähnte Abbildung sowie die Formel beziehen sich auf 0,2 cm dicke, verkupferte Eisenlöschbleche. Das bedeutet, daß der Mindestabstand zwischen den Löschblechen bei $I = 400$ A und $v = 100$ cm/sec 0,85 mm beträgt.

Nach BRON beträgt der Mindestabstand der Löschbleche bei $I = 7000$ A für Kupferlöschbleche 1 mm, für Eisenlöschbleche 2 mm.

Beobachtungen zufolge nimmt der Mindestabstand der Löschbleche beim Anwachsen der den Lichtbogen bewegendenden Kraft ab, d. h. eine größere Kraft ist in der Lage, die Bogensäule auch in den kleineren Spalt hineinzuzwängen. Die auf den Lichtbogen wirkende Kraft hängt selbstverständlich mit der Auftreffgeschwindigkeit zusammen; je größer die Kraft, um so schneller trifft der Lichtbogen auf die Löschblechkanten auf.

Das Auftreffen des Lichtbogens auf die Löschbleche ist bei Gleich- und Wechselstrom grundlegend verschieden. Bei Gleichstrom bleibt der Lichtbogen — wenn er nicht zwischen die Löschbleche eindringen kann — unterhalb der Löschbleche stehen und vernichtet die Kammer.

Bei Wechselstrom dagegen bleibt der Lichtbogen, sofern er nicht zwischen die Löschbleche eindringen kann, zunächst ebenfalls unter den Löschblechen stehen, trifft aber, da sein Durchmesser von der Stromstärke abhängt, in der Nähe des Stromnulldurchganges auf die Löschbleche auf.

Er verharrt also an den Löschblechunterkanten, bis der Strommomentanwert den für ihn günstigen Wert erreicht hat.

Die Zusammenfassung der Ergebnisse von BRON und BURKHARDT gestattet die Feststellung, daß die unteren Lichtbogenteile an Ort und Stelle verharren, daß sich die in den Löschblechzwischenräumen befindlichen Lichtbogenteile so lange weiterbewegen, bis sie die notwendige Länge erreicht haben, worauf sich der Lichtbogen aufteilt. BRON meint unter »Stehen« offenbar das Verharren des unterhalb der Löschbleche verbleibenden Bogenteiles.

Unterdessen entstehen in den anderen Bogenteilen Veränderungen, die die Aufteilung des elektrischen Lichtbogens in Teillichtbögen ermöglichen.

Nach unserer Ansicht liefern die Untersuchung der durch die Selbstbebläsung sowie durch die Krafterwirkung der Löschbleche hervorgerufenen Lichtbogenbewegung an Versuchsanordnungen, die weitgehend den Anforderungen der Praxis entsprechen, sowie die genaue Kenntnis der Form des Lichtbogens vor seiner Aufspaltung wertvolle Unterlagen für die Entwicklung von Schaltern.

2. Eigene, mit Zeitlupe festgehaltene Untersuchungen

2.1. Beschreibung der Versuchseinrichtung

Bei den eigenen Versuchen wurde — abweichend von den bisherigen Versuchen — keine magnetische Bebläsung von außen angewendet; die Löschbleche waren fixiert. Der Lichtbogen gelangte durch die Krafterwirkung der Eisenlöschbleche sowie durch den Einfluß der Selbstbebläsung an das Löschblechpaket.

Der Lichtbogen erschien nach dem Schmelzen eines — durch ein 0,8 mm großes Loch gezogenen — Kupferfadens zwischen parallel angeordneten 2 cm breiten und 0,3 cm dicken Elektroden, die einander mit den breiteren Seiten zugekehrt waren. Die Elektrodenlänge betrug 24 cm, die Einspeisung konnte von beiden Seiten aus erfolgen.

Der Schmelzfaden befand sich 12 cm von dem einen Elektrodenende entfernt. Erfolgte nun die Einspeisung nur von einem Ende, löste auch die Selbstbebläsung die Bewegung des Bogens aus, erfolgte sie jedoch von beiden Enden, dann floß ein Strom $I/2 - I/2$ in Richtung des Lichtbogens. Das daraus entstehende magnetische Feld wurde Null, die Selbstbebläsung konnte somit ausgeschaltet werden. Zwischen die parallel angeordneten Elektroden spannten wir Löschbleche ein (*Abb. 6*), deren Dicke 0,2 cm und deren Abstand voneinander ebenfalls 0,2 cm betrug. In den Löschblechspalten befanden sich Bakelit-Zwischenstücke, die in der Abbildung der Übersicht wegen weggelassen wurden. Da zwei Löschbleche benutzt wurden, betrug die Bogenlänge $l = 1$ cm. Der Stromkreis, in dem sich auch der den Lichtbogen zustande bringende Schmelzfaden befand, wurde aus einem Gleichrichter mit 220 V Gleichspannung gespeist. Zur Verhinderung der raschen Stromschwankungen war in den Stromkreis eine Induktivität $L = 0,001$ Hy eingeschaltet. Die Zeitkonstante des Stromkreises betrug $T \simeq 2$ ms.

Bei $U = 220$ V Netzspannung sinkt der Strom bei kurzen Lichtbögen nach dem Auftreten der Lichtbogenspannung um etwa 10%. Deshalb wurde der Strom auf 440 A eingestellt, so daß der Lichtbogenstrom vom 400 A

starken Versuchsstrom nicht wesentlich abwich. Selbstverständlich beträgt der Strom nur in größerem Abstand von den Löschblechen $I \approx 400$ A, nach der Aufteilung sinkt er wegen der erhöhten Lichtbogenspannung auf jeden Fall.

An der beschriebenen Versuchseinrichtung wurde die Wanderung des Lichtbogens von der Stelle seiner Entstehung bis zu den Kanten der Löschbleche gefilmt. Die Aufteilung des Lichtbogens sowie die Bewegung der Teillichtbögen sind gut erkennbar.

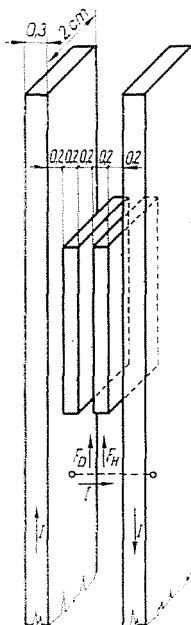


Abb. 6. Schematische Darstellung der Versuchsanordnung mit den seitlich angebrachten Elektroden und den dazwischenliegenden Löschblechen

Bei den Messungen wurde eine Pentazet 16 Zeitlupenkamera benutzt, deren Bildfrequenz von 600—3000 Bildern/sec variierte. In die Kamera können 30 m Film eingelegt werden, und diese Filmmenge läuft auch auf einmal ab. Während der Aufnahme läuft der Film mit großer Geschwindigkeit ab, und das Ausschalten hätte die Anlage zerstört. Die Beschleunigungszeit ist ziemlich lang, etwa 0,7 sec. Bei einer Bildfrequenz von 3000 Bildern/sec laufen die 30 m Film in etwa 1,5 Minuten ab. Die mechanische Beanspruchung des Filmes in der Kamera ist so groß, daß das Werk für derartige Aufnahmen besondere Filme mit großer mechanischer Stabilität empfiehlt. Bei den meßtechnischen Ausführungen waren zwei Aufgaben zu erfüllen:

a) Die Filme wurden sofort am Meßplatz entwickelt, so daß sie sogleich kurz beurteilt werden konnten. Nach dem Trocknen erfolgte die gründliche Auswertung. Damit konnten die langwierigen Filmlaborarbeiten umgangen werden, die eine kontinuierliche Arbeit unmöglich gemacht hätten.

b) Es mußten Erfahrungen in der Technik der Aufnahme der Lichtbogenwanderung gesammelt werden.

Die Untersuchungen bezweckten die Darstellung des Verlaufs der Lichtbogenbewegung an den Löschblechen sowie die Darstellung der Aufteilung des

Bogens, die das entscheidendste Moment in der Funktion der Löschblechkammern bildet.

Wie bereits gezeigt, untersuchte BRON die Aufteilung des Lichtbogens, indem der Lichtbogen mit Hilfe eines durch eine Spule erzeugten Magnetfeldes an die aus Kupfer bestehenden Löschbleche drängte. BURKHARDT dagegen ließ zwischen zwei kleine Kontakte ein Löschblechpaket von oben in den brennenden Lichtbogen hineinfallen. Beide Versuchsreihen ergaben wertvolle Ergebnisse. Dagegen steht die hier benützte Versuchseinrichtung, bei der der Lichtbogen zum einen durch Verhinderung der Selbstbebläsung, zum anderen durch deren Zwischenschaltung so an die Löschbleche gelangte, daß keine äußere magnetische Bebläsung erforderlich war, dem Schutz um einen Schritt näher.

Von den Lichtbogenbewegungen wurden zahlreiche Filmaufnahmen gemacht, und der wesentlichste Teil der gut reproduzierbaren Filme wird auch veröffentlicht. Die Lichtbogenform ist auf den Aufnahmen gut erkennbar. Zur Demonstration des zeitlichen Ablaufs der Erscheinung wurden Bewegungsdiagramme aufgetragen, auf denen die Fortbewegung des Lichtbogens in Abhängigkeit von der vom Beginn seiner Bewegung verstrichenen Zeit zu erkennen ist. Dazu mußte die Lage des Lichtbogens markiert werden. Im allgemeinen ist es schwierig, auf den Bildern die glühenden Gase vom stromleitenden Lichtbogen zu unterscheiden. Kann jedoch der Anfang des bewegten Lichtbogens gut begrenzt werden, lassen sich beide voneinander gut unterscheiden. Da das Magnetfeld nur auf den Stromleiter eine Kraftwirkung ausübt, kann der in Bewegungsrichtung vorn sichtbare, lichtstarke Teil mit großer Gewißheit als Rand des Lichtbogens identifiziert werden. Werden die Filme dunkler entwickelt, kann man auf Grund der unterschiedlichen Helligkeit ebenfalls den Lichtbogen von den glühenden Gasen unterscheiden.

Die Filme wurden projiziert und so ausgewertet, daß die Lichtbogenbewegung mit einer Genauigkeit von etwa $\pm 10\%$ bestimmt werden konnte.

2.2. Untersuchungsergebnisse

Von den vielen Filmen werden hier nur zwei gezeigt, und auch von diesen nur einige Aufnahmen, u. zw. jene, auf denen die Aufteilung des Lichtbogens zu sehen ist.

a) Bei Verhinderung der Selbstbebläsung wurde durch zahlreiche Experimente festgestellt, daß die Löschbleche, deren Breite $b = 1,5, 2,5$ und 4 cm betrug, bei einem Abstand von $1,2-1,8$ cm den Lichtbogen am besten anziehen konnten. Die kleineren Blechabstände gehören zu den kleineren Löschblechbreiten. Bekannt ist auch [7, 8], daß sich die auf den Lichtbogen wirkende Anziehungskraft mit dem Anwachsen der Löschblechbreiten vergrößert.

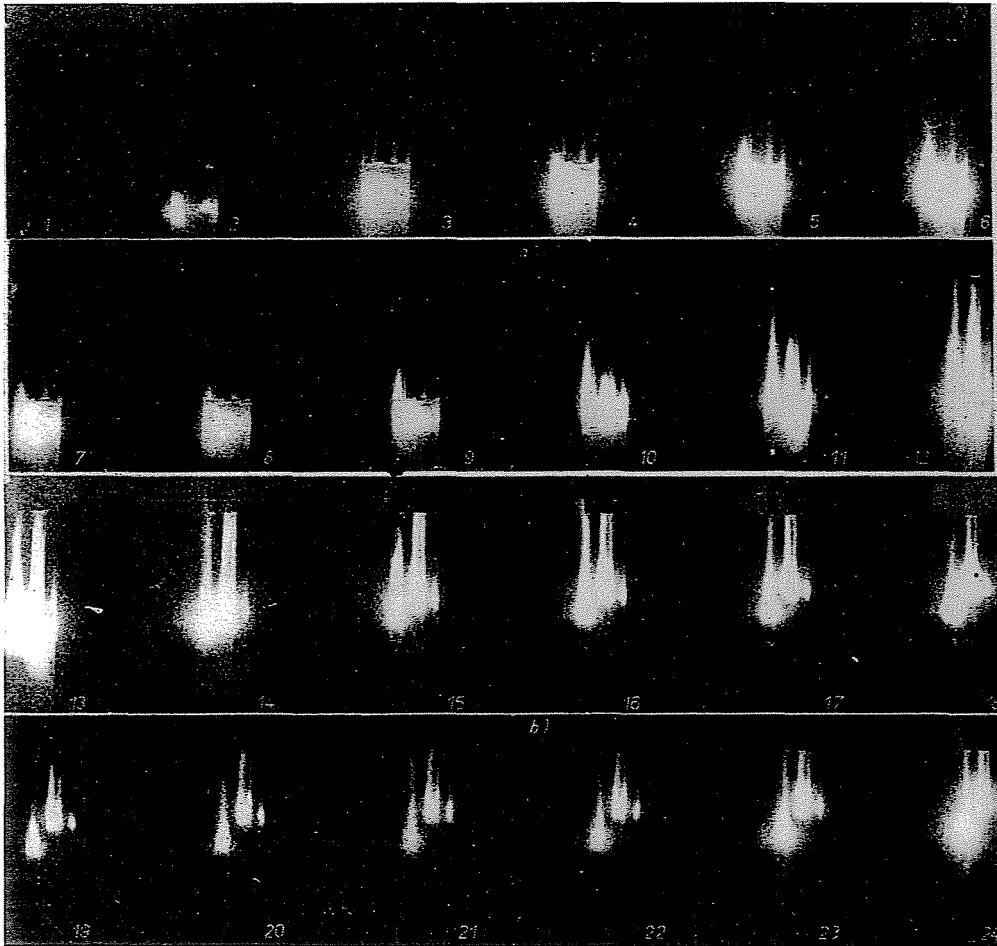


Abb. 7. Die Lichtbogenbewegung in der Nähe der Löschbleche bei $I_0 = 440$ A Gleichstrom. Zwischen den beiden Aufnahmen liegt eine Zeit von 0,64 ms

Sind die Löschblechabstände größer als erwähnt, gelangt der Lichtbogen durch Einfluß der Seitenkräfte an den Rand des Löschbleches, wo er starken Abbrand verursacht, oder er wandert langsam, die Oberfläche der Elektrode anbrennend, in Richtung der Löschbleche.

b) Die Abb. 7 zeigt die Zeitlupenaufnahmen. Auf dem 1. Bild brennt der Lichtbogen noch nicht, auf dem 2. Bild schmilzt eben der Faden, während der Lichtbogen entsteht, auf dem 3. Bild ist der Bogen am Rand der Löschbleche angelangt, auf den Bildern 4—12 wölbt sich der Lichtbogen immer tiefer zwischen die Löschbleche ein, auf dem 13. und 14. Bild ist schließlich die Aufteilung des Lichtbogens zu beobachten. Auf den Bildern 12—24 ist allmähliches Abkühlen der durch die Bogenschleifen erhitzten Gase zu beobachten.

Die Löschblechbreite betrug 4 cm und zur Erhöhung der Anziehungskraft wurde außer den Elektroden noch je ein Blech ähnlichen Ausmaßes angebracht.

Die Abb. 7 wurde projiziert und so ausgewertet; das den Bewegungsprozeß darstellende Diagramm zeigt die Abb. 8. Daraus geht hervor, daß der Lichtbogen 1,3 ms nach Beginn des Prozesses die Blechkante erreicht und der Lichtbogenrand bis zu den Löschblechkanten einen etwa 0,6 cm langen Weg zurücklegt. Für die Geschwindigkeit ergibt sich daraus ein Wert von $v \approx 4,6$

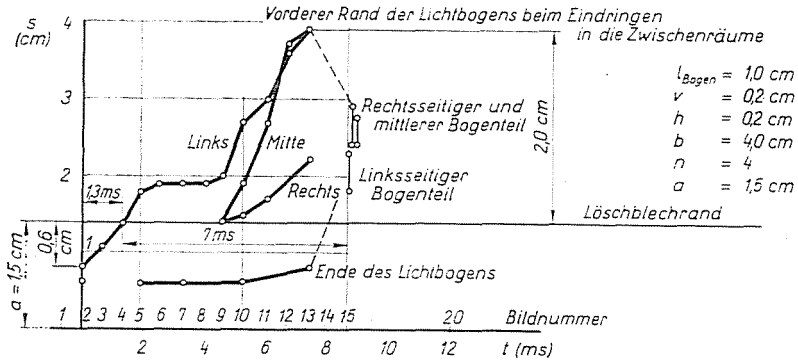


Abb. 8. Auswertung der Abb. 7: Die Lichtbogenbewegung in Abhängigkeit von der Zeit

m/sec. Der Lichtbogen wölbt sich ungefähr 2,6 cm tief zwischen die Löschbleche ein und spaltet sich innerhalb von 7 ms auf.

e) Werden die Elektroden nur von einem Ende aus gespeist, treibt die Selbstbebläsung den Lichtbogen ebenfalls an die Löschbleche, wie dies die Abb. 9 zeigt. Die Löschblechbreite betrug hier $b = 2,5 \text{ cm}$.

Der Schmelzfaden war 1,8 cm weit vom Löschblechrand angebracht. Der auf dem 2. Bild entstehende Lichtbogen wölbt sich auf den Bildern 4—14 immer tiefer in den Löschblechzwischenraum ein, und auf dem 15. Bild sind zwei Teillichtbögen im linksseitigen und im mittleren Elektrodenzwischenraum zu sehen. Deshalb nur zwei, weil auf diesem Film durch einen glücklichen Zufall die Bildung eines Schmelzkegels zu sehen ist, der die rechtsseitige Elektrode mit dem neben ihr liegenden Löschblech verbindet. Der Schmelzkegel war bereits auf Bild 14 zu sehen. Sein Durchmesser nimmt ständig zu. Es ist interessant zu beobachten, daß vor der Aufteilung eine leuchtende Gaswolke auftritt, die auch auf anderen Aufnahmen bereits wahrnehmbar war.

Dem Bewegungsdiagramm der Abb. 10 ist zu entnehmen, daß der Lichtbogenrand die Löschblechkante in 1 ms erreichte und sich innerhalb von 5—7 ms aufteilte. Etwa 1,8 cm tief wölkte er sich in die Löschblechzwischenräume ein.

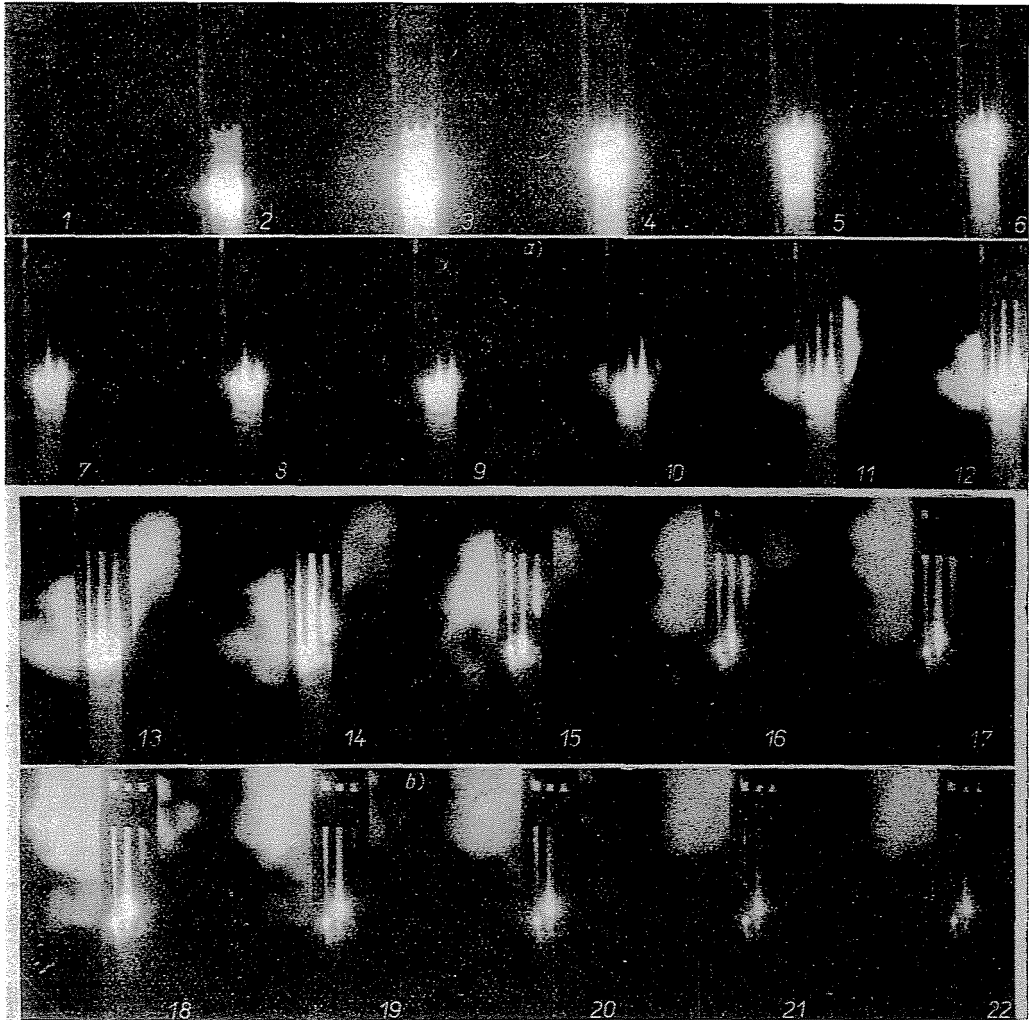


Abb. 9. Die Lichtbogenbewegung in der Nähe der Löschbleche bei $I_0 = 440$ A Gleichstrom. Zwischen den beiden Aufnahmen liegt eine Zeit von 0,51 ms

Wegen Platzmangel enthält die Abb. 11 nur das Diagramm des Bewegungsprozesses. Bei dieser Messung war der Löschblechabstand auf 0,1 cm verringert, somit betrug die Lichtbogenlänge $l = 0,7$ cm. Der Bogen erreichte die Löschblechkante innerhalb von 2,8 ms, und die Aufspaltung dauerte 13 ms. Diese verlängerte Zeit kam offensichtlich durch den Einfluß der kleineren Blechabstände zustande. Der Bogen senkte sich etwa 2,1 cm tief in die Löschblechzwischenräume ein.

Für den Beginn des Bogenbewegungsprozesses ist der Einfluß der Selbstbebläsung im Abschnitt zwischen dem Entstehungspunkt des Bogens

und den Löschblechkanten von ausschlaggebender Bedeutung. Gelangt der Lichtbogen an die Löschblechkanten, ist der Einfluß der Selbstbeblaspung wegen der von den Löschblechen herrührenden wesentlich größeren Kräfte

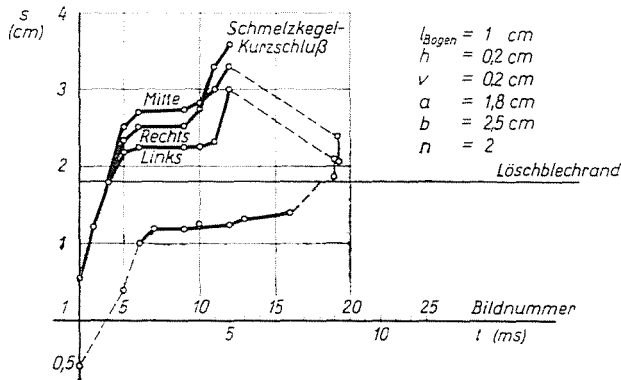


Abb. 10. Auswertung der Abb. 9: Die Lichtbogenbewegung in Abhängigkeit von der Zeit

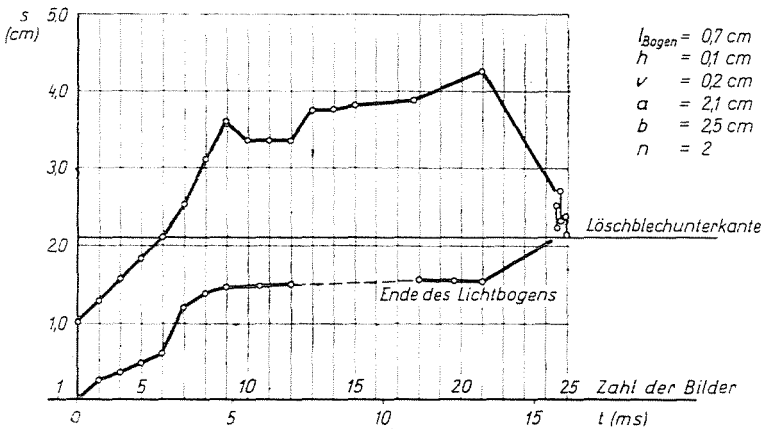


Abb. 11. Darstellung der Lichtbogenbewegung in Abhängigkeit von der Zeit bei Spalten von $h = 0,1 \text{ cm}$

nicht mehr so entscheidend. Aus diesem Grunde werden die gewonnenen Ergebnisse gemeinsam zusammengefaßt.

Die Tabelle 1 enthält eine Zusammenfassung der Daten der den Bewegungsprozeß darstellenden Diagramme.

Unseres Erachtens lassen diese Meßdaten auf die kleinste Höhe der Löschbleche schließen. Die Löschblechhöhe muß mindestens 2—2,5 cm betragen, damit sie die vor der Aufteilung entstehenden Bogenschleifen gut voneinander trennen und wirksam kühlen kann.

Die Tabelle 1 enthält auch die Dauer der Aufteilung des Bogens. In einem Falle wurde eine Zeit von 75 ms gemessen, doch zeigten die Messungen, daß sich der Gleichstromlichtbogen bei Verwendung quadratischer Löschbleche

Tabelle I

Schleifenhöhe (cm)	Zeitdauer der Aufteilung (ms)	Höhe der Teillichtbögen oberhalb der Löschblechkanten (cm)
1,8	8	0,6
2,6	7	0,6
1,8	5—7	0,2
2,1	13	0,4

in 5—13 ms spaltet, wenn der Bogen auf die Löschbleche auftrifft. Das ist eine verhältnismäßig lange Zeit, deren genaue Kenntnis für die Konstruktion des Gerätes von Nutzen ist, da die wirksame Lichtbogenlöschung erst nach der Aufteilung beginnt.

3. Die Untersuchung der Lichtbogaufteilung an Gleichstrom-Lastschaltern

Die bisherigen Ausführungen betrafen die Wanderung des Lichtbogens sowie die Dauer seiner Aufteilung. Dieser Abschnitt ist den Versuchen an einem Gleichstrom-Lastschalter gewidmet, die den Zusammenhang zwischen den Messungen an der prinzipiellen Versuchseinrichtungen und jenen an Lastschaltern mit Löschblechen demonstrieren sollten.

Die Versuche wurden an einem Lastschalter EVIG SzH 201 vorgenommen; die Netzspannung lag bei $U = 244$ V, die Stromstärke bei $I_0 = 160—245$ A. Die drei Phasen des bei Wechselstrom ebenfalls brauchbaren Lastschalters waren in Reihe geschaltet. Der Strom sowie die an den Ecken des Schalters auftretende Spannung wurden mit einem Oszillographen registriert. Außerdem war der stehende Kontakt der einen Phase mit dem nächstliegenden Löschblech und der stehende Kontakt mit den zweiten Löschblech durch je eine Oszillographenschleife verbunden (*Abb. 12*). Trifft der Lichtbogen auf die Löschbleche auf, entwickelt sich in diesen eine durch den Lichtbogen bestimmte Spannung, und in den Oszillographenschleifen fließt ein Strom. Es wurden sieben Messungen durchgeführt und dabei aus dem Oszillogramm die Bogenlöschungsdauer sowie die Dauer des Bewegungsablaufs bestimmt. Die *Abb. 13* zeigt zwei charakteristische Aufnahmen. Wie ersichtlich, hat die Spannung nach der Bogenlöschung wegen der dreiphasigen Gleichrichtung einen wellenförmigen Verlauf. Die Ergebnisse aus den Oszillogrammen sind in Tabelle 2 zusammengefaßt.

Die Zeit vom Bewegungsbeginn bis zur Aufteilung des Bogens schwankt also zwischen 7,8 und 13,7 ms. Berücksichtigt man die Tatsache, daß der Bogen eine Zeit von 1–2 ms braucht, um unter die Löschbleche zu gelangen, erhält, daß die Aufteilungszeit des Lichtbogens eine gute Übereinstimmung mit den an der prinzipiellen Anordnungen gemessenen Zeiten von 5–13 ms zeigt.

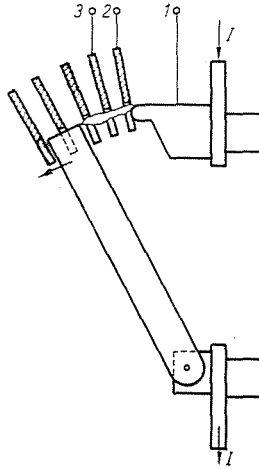


Abb. 12. Schematische Darstellung des Anschlusses der Löschbleche zur Untersuchung der Aufteilung des Lichtbogens

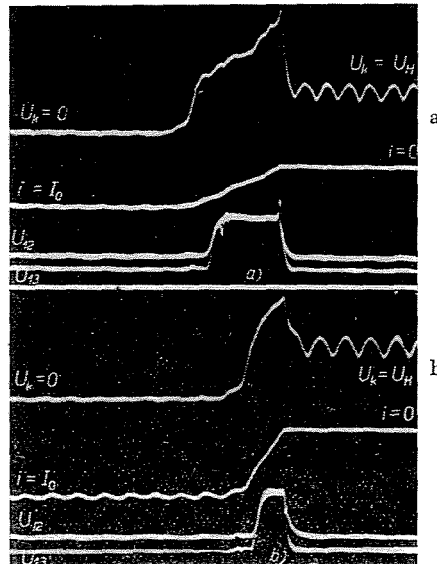


Abb. 13. Oszillogramme der Bogenlöschung an Gleichstrom-Lastschaltern sowie der Lichtbogenaufteilung:

- a) $U_H = 244 \text{ V}$, $I_0 = 150 \text{ A}$, $T = 50 \text{ ms}$, $t_{\text{Bogen}} = 35 \text{ ms}$, $t_D = 12,2 \text{ ms}$;
 b) $U_H = 244 \text{ V}$, $I_0 = 215 \text{ A}$, $T = 13,7 \text{ ms}$, $t_{\text{Bogen}} = 16,1 \text{ ms}$, $t_D = 7,8 \text{ ms}$

Ein anderer wesentlicher Faktor dieser Meßreihe ist, daß die von der Entstehung des Lichtbogens bis zu seinem Auftreffen auf die Löschbleche verstrichene Zeit 20—50% der gesamten Bogenzeit beträgt. Während 50—80% der Löszeitdauer brennt also der Bogen zwischen den Löschblechen. Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß sich der Lichtbogen bei Anwendung

Tabelle 2

Zeitkonstante des Stromkreises T (ms)	Lichtbogen- löszeit t_{Bogen} (ms)	Bis zur Aufteilung des Lichtbogen verstrichene Zeit t_D (ms)
13,7	16,1	7,8
28	36,8	13,7
28	26,6	13,0
28	25,8	8,6
50	42,2	8,9
50	42,2	12,9
50	35	12,2

quadratischer Löschbleche innerhalb von 5—13 ms, ungefähr 1,5—2,5 cm tief zwischen die Löschbleche einwölbt und sich dann aufteilt. Der zwischen die Bleche eingewölbte Lichtbogenzweig erlischt, und die Teillichtbögen erscheinen in einer Höhe von 0,2—0,6 cm oberhalb des Löschblechrandes.

Literatur

1. BRON, O. B.: Elektrischeskaja duga w apparatah uprawlenija. Gosenergoisdat, Moskwa—Leningrad, 1954.
2. KANABÉ, J.: A termézetes ivoltás alkalmazása kifeszültlégségű készülékeknél. EVIG Közlemény 1 (1965).
3. BURKHARDT, G.: Ein Beitrag zur Lichtbogenwanderung auf ferromagnetischen Flächen-
elektroden. Elektrie 15, 363 (1961).
4. BURKHARDT, G.: Untersuchungen über das Lichtbogenverhalten in Löschblechkammern.
Elektrie 14, 424 (1960).
5. BURKHARDT, G.: Über die Ausbildung der Teillichtbögen in Löschblechkammern. Elektrie
16, 270 (1962).
6. DOMONKOS, S.: Kifeszültlégségű ívek oltása. Elektrotechnika 53, 503 (1960).
7. DOMONKOS, S.: Über die zwischen den Deionlöschblechen und dem Lichtbogen auftretenden
Kräfte. Periodica Polytechnica 1 (1964).
8. DOMONKOS, S.: Die Bestimmung der den Lichtbogen an die Löschbleche anziehenden
Kräfte. Periodica Polytechnica 2 (1965).
9. IGRICKIJ, A. L.: Issledowanije dugi postojannogo toka stolnoj dugogasilnoj reschetke.
Elektricschestwo 9, 12 (1952).
10. FINKELNBURG—MAECKER: Elektrische Bögen und thermische Plasma. Handbuch der
Physik. XXII, 254.

Zusammenfassung

Verfasser gibt als Einleitung einen Überblick über die Literatur der Aufteilung des elektrischen Lichtbogens, insbesondere über die Arbeiten von Bron und Burkhardt. Hierauf beschreibt er die Ergebnisse seiner eigenen Untersuchungen. Der Gleichstromlichtbogen wurde unter dem Einfluß der Selbstbeblasung zwischen parallel angebrachten Elektroden an die Löschbleche befördert. Die Zeitlupenaufnahmen zeigen, daß die Aufteilung des unter den Löschblechen angelangten Lichtbogens bei einer Stromstärke von 400 A innerhalb von 5—13 ms vonstatten geht. Der Lichtbogen wölbte sich inzwischen 1,5—2,5 cm tief in die Löschblechzwischenräume ein. Die Teillichtbögen bildeten sich 0,2—0,6 cm oberhalb der Löschblechkanten aus. Vergleichsweise bestimmte er die bis zur Aufteilung verstrichene Zeit an einem mit Löschblechen ausgerüsteten Lastschalter und erhielt dabei eine Zeit von 7,8—13,8 ms. Diese Zeit stimmt mit der obengenannten Zeit völlig überein.

Sándor DOMONKOS, Budapest XI. Egry József u. 18—20. Ungarn.