

EINFLUSS DER WECHSELSTROM-LICHTBOGEN- WANDERUNG AUF DIE ELEKTRODEN

Von

S. DOMONKOS

Lehrstuhl für Hochspannungstechnik und -geräte an der Technischen Universität,
Budapest

(Eingegangen am 18. Mai, 1962)

Vorgelegt von Prof. Dr. J. EISLER

Einleitung

Für den Konstrukteur von Schaltgeräten ist es wichtig, die Eigenschaften des elektrischen Lichtbogens zu kennen. Um die Wanderungs-Eigenschaften des Lichtbogens klarzustellen, wurden in der letzten Zeit viele Versuche mit Gleichstromlichtbogen zwischen parallelen Schienen durchgeführt. Offenbar müssen die Umstände, wie sie bei den mit vereinfachten Modellen durchgeführten Versuchen bestehen, den in Schaltgeräten tatsächlich bestehenden Verhältnissen schrittweise angeglichen werden. Die in diesem Aufsatz behandelten Versuche wurden mit Wechselstrom durchgeführt. Da der Abbrand und die Abnahme der Elektroden hauptsächlich vom Verhalten des Lichtbogenfußpunktes, d. h. jenes Punktes abhängt, an dem Elektrode und Lichtbogen zusammentreffen, war es dieser Punkt, der eingehend untersucht wurde.

Physikalische Grundlagen

Es erscheint zweckmäßig, zunächst die Vorgänge zu betrachten, die sich in elektrischen Lichtbogen abspielen.

Der elektrische Lichtbogen, der zwischen zwei Elektroden entsteht, führt zu einer thermischen Beanspruchung beider Elektroden. Elektronen treten aus der Kathode aus und bewegen sich unter dem Einfluß der Feldstärke zur Anode. Die Ionen bewegen sich in entgegengesetzter Richtung. Da zur Aufrechterhaltung des Lichtbogens Ladungsträger nötig sind, wird es verständlich, daß das Bestehen des Lichtbogens dann gesichert ist, wenn der Kathodenfußpunkt in ständiger Bewegung ist. Der Anodenfußpunkt kann sich in Sprüngen, in nicht stetiger Bewegung bewegen.

Nach Engel und Steenbeck kann die Kathode die für die Aufrechterhaltung des Lichtbogens nötigen Elektronen auf zweierlei Arten emittieren: durch Thermoemission und durch Feldemission. Bei der Thermoemission gibt es einen Glühfleck an der Kathode, von dem die Elektronen in großen Mengen austreten. Bei der Feldemission befindet sich in der Nähe der Kathode ein

starkes Feld in der Größenordnung von 10^6 V/cm, das den Elektronen den Austritt ermöglicht, ohne die Kathode thermisch in Anspruch zu nehmen.

Bei einigen Stoffen, wie z. B. bei Kohle und Wolfram, ist die Wanderung des Kathodenfußpunktes nur möglich, wenn der Glühfleck wandert. Der Kathodenfußpunkt kann sich als nur dadurch versetzen, daß sich der Stoff vor ihm erhitzt.

Bei anderen, flüchtigen Stoffen, wie z. B. bei Kupfer und Zinn, kann der Kathodenfußpunkt während seiner Wanderung durch Feldemission Elektro-

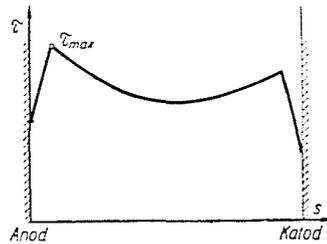


Abb. 1. Qualitative Temperaturverteilung in einem el. Lichtbogen

nen bereitstellen. Zur Feldemission bedarf es einer großen Gas- oder Metaldampfdichte, und dies bildet den Grund dafür, daß sie bei schwer flüchtigen Stoffen wie Wolfram und Kohle, nicht zustande kommen kann. Es steht außer Zweifel, daß die Kathode bei schneller Lichtbogenwanderung keine thermische Beanspruchung erleidet, doch ist die obige Erklärung nur als Annahme zu betrachten.

Die aus der Kathode austretenden Elektronen werden durch den Kathodenfall beschleunigt, so daß sie im Lichtbogen durch Stoßionisation weitere Ladungsträger produzieren. Im Lichtbogen bewegen sich daher Elektronen mit kleiner Masse und großer Geschwindigkeit und in entgegengesetzter Richtung Ionen mit größerer Masse und kleinerer Geschwindigkeit. Die Elektronengeschwindigkeit erreicht ungefähr das 400fache der Ionengeschwindigkeit. Die mit großer Geschwindigkeit auf der Anode aufprallenden Elektronen verursachen auf dieser eine beträchtliche Erwärmung. Es ist bezeichnend, daß die höchste Temperatur an der Grenze des Anodenfalles auftritt. Die Temperatur der Anode ist auch wesentlich höher als die der Kathode (Abb. 1).

Die thermische Wirkung, die unter dem Einfluß der auf der Anode aufprallenden Elektronen entsteht, macht den Anodenstoff an einer kleinen Stelle flüssig, Metaldämpfe verlassen die Anode, allenfalls kann ein Schmelzkegel entstehen.

Überblick über die Literatur der Lichtbogenwanderung

I. GÖNENC führte seine Untersuchungen an kreisrunden Elektroden aus verschiedenen Stoffen durch und veränderte hierbei den Elektrodendurchmesser und den Strom. Er untersuchte hauptsächlich den Zusammenhang zwischen Elektrodenmaterial und Lichtbogengeschwindigkeit und stellte fest, daß die Lichtbogengeschwindigkeiten bei einer gegebenen Anordnung folgende Reihenfolge haben: $V_{Fe} > V_{Cu} > V_{Al}$. Er beobachtete, daß der Lichtbogenfußpunkt bei kleiner Lichtbogengeschwindigkeit gegenüber dem eigentlichen Lichtbogen zurückbleibt. Dagegen bewegen sich beide bei mittleren Geschwin-

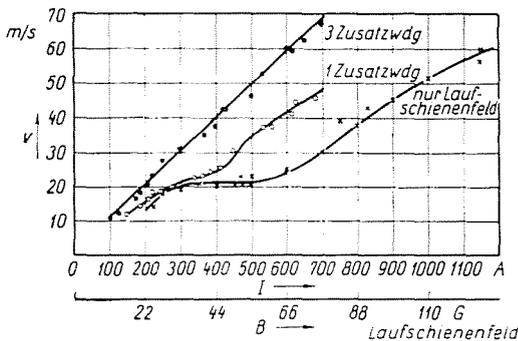


Abb. 2. Die Lichtbogengeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Stromstärke, nur mit Laufschienenfeld, mit 1 Zusatzwindung und mit 3 Zusatzwindungen [2]

digkeiten in einer Linie, während bei großen Geschwindigkeiten der Fußpunkt voraneilt. Diese Erscheinung ist eine Folge des Lichtbogen-Reibungswiderstandes in der Luft und des Widerstandes der Fußpunktbewegung. Die Lichtbogenwanderung wurde durch das eigene magnetische Feld der Schienen sichergestellt. Die Versuche wurden mit Wechselstrom von 200 . . . 1000 A durchgeführt. Die Lichtbogengeschwindigkeit wurde durch Erfassung der zur Zurücklegung einer gegebenen Strecke nötigen Zeit mit einem Oszillographen gemessen.

HESSE machte eingehende Versuche mit Gleichstrom von 100 . . . 1400 A an verschiedenen, im Querschnitt quadratischen Schienenprofilen. Er stellte fest, daß die Lichtbogengeschwindigkeit bei gewissen Profilen bei Erhöhung der Stromstärke nicht verhältnismäßig mit dem Strom anwächst, sondern konstant bleibt (Abb. 2), ja bei steigender Stromstärke sogar abnehmen kann.

Der kritische Bereich liegt zwischen 300 und 700 A, bei Lichtbogengeschwindigkeiten von ungefähr 15 . . . 20 m/s. Die Erscheinung wird in der Literatur verschieden gedeutet. Nach BURCHOFF z. B. wächst die Luftreibung an, weil die laminare Strömung in eine turbulente übergeht. HESSE gibt drei grundlegende Methode der Lichtbogenfußpunktwanderung an:

1. Fußpunktwanderung mit großer Geschwindigkeit ($v > 50$ m/s). Infolge der großen Lichtbogengeschwindigkeit ist die thermische Beanspruchung der Elektroden gering. Die Lichtbogenspur auf der Kathode ist eine leichte Oxydschicht, während die Anode geringfügige Schmelzspuren trägt. Die Lichtbogenspannung am Oszillographen ist ruhig.

2. Übergangszone ($v = 25 \dots 50$ m/s). Die Lichtbogenspannung zeigt Schwankungen, die thermische Beanspruchung ist größer.

3. Fußpunktwanderung mit kleiner Geschwindigkeit ($v < 25$ m/s). Der Kathodenfußpunkt bewegt sich stetig. Im Anodenfußpunkt wird die Elektrode flüssig, es bildet sich ein Schmelzkegel, der sich stabilisiert, und der Licht-

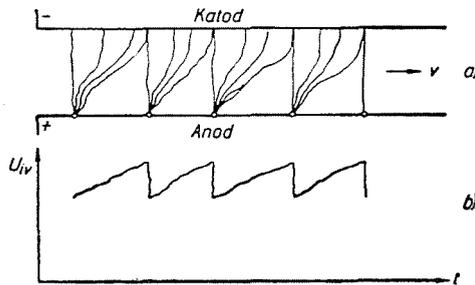


Abb. 3. Form und Spannung eines relativ langsamen Lichtbogens

- a) Form des Lichtbogens
b) die Lichtbogenspannung

bogen wird immer länger. Der Kathodenfußpunkt bewegt sich so lange nach oben, bis ein neuer Durchschlag erfolgt. Die stetig steigende Lichtbogenspannung fällt in diesem Augenblick zurück. Diese Bewegungsform ist in Abb. 3 dargestellt. Die Lichtbogenspannung hat die Form von Sägezähnen, deren Zahl mit der Anzahl der Schmelzkegel auf der Anode übereinstimmt.

Die Lichtbogenwanderung wurde durch das eigene Magnetfeld verursacht. Die Lichtbogengeschwindigkeit wurde durch HESSE mit Hilfe der Impulse der längs der Schienen untergebrachten Photozellen ermittelt. Werden Oszillogramme gemacht, läßt sich die Zeitdauer zwischen den Impulsen bestimmen. Sind die Entfernungen zwischen den Lichtelementen bekannt, so kann die Lichtbogengeschwindigkeit berechnet werden.

HESSE führte seine Versuche mit Gleichstrom durch, wobei die Veränderungen des Magnetfeldes während der Lichtbogenwanderung mit einem Hall'schen Generator gemessen wurden.

GUILLE und SECKERT führten ausgedehnte Versuche durch, um den Mechanismus der Lichtbogenwanderung zu klären. Bei der Untersuchung der Kathodenfußpunktwanderung konnten sie drei charakteristische Gruppen der fußpunktspuren unterscheiden. Diese Gruppen weisen auf die starke, mittlere und schwache thermische Beanspruchung hin. Nach ihnen ist es hauptsächlich

die Kathodenfußpunktwanderung, die die Lichtbogengeschwindigkeit bestimmt. Interessant ist ihre Feststellung, daß der Kathodenfußpunkt aus mehreren parallelgeschalteten Teilen besteht, durch die je 40 A fließen. Sie stellten fest, daß die Lichtbogengeschwindigkeit zwischen 40 und 670 A bei äußerer, magnetischer Blasung von der Stromstärke unabhängig war. Dies erklären sie damit, daß die Zahl der parallelen Äste mit wachsender Stromstärke wächst und daß somit kein Grund zur Änderung der Geschwindigkeit vorliegt.

Diese Erscheinung ist umstritten. Nach anderen Autoren wächst mit wachsender Stromstärke auch die zur Wanderung des Fußpunktes nötige Kraft an, die Geschwindigkeit kann mithin nicht wachsen, ja sie kann sogar abnehmen.

Für die Kathodenfußpunktwanderung ist die Oberflächenbeschaffenheit der Kathode ausschlaggebend. Ist an der Oberfläche eine Oxydschicht vorhanden, so kann der Kathodenfußpunkt nur langsam wandern. Nach einigen Lichtbogenwanderungen ergeben sich wesentlich größer Lichtbogengeschwindigkeiten, da die auf der Kathode aufprallenden Ionen durch ihre thermische und mechanische Wirkung die Oberflächenbeschaffenheit der Kathode beeinflussen. Zuletzt wird die Lichtbogenwanderung durch die Luftreibung und durch die zur Anodenfußpunktwanderung erforderliche Kraft bestimmt.

So z. B. wurde von HESSE bei sonst gleichbleibenden Verhältnissen und unveränderten Stromstärken bei der ersten Wanderung eine Lichtbogengeschwindigkeit von $v = 39$ m/s, bei der fünfzehnten hingegen eine solche von $v = 87$ m/s gemessen.

NÖSKE hielt bei der Messung der Lichtbogengeschwindigkeit den Bogenstrom nur für kurze Zeit aufrecht, so daß der Strom aufhörte, bevor der Lichtbogen die Elektrodenkante erreichte. Er befaßte sich eingehend mit der Entstehung und Berechnung des Schmelzkegels und stellte einen Zusammenhang zwischen der Lichtbogendauer und der Höhe des Schmelzkegels fest.

Im Hinblick auf diese Erscheinung sollten die Elektroden vor den Versuchen »eingefahren« werden. Bei der Untersuchung von Kleinspannungsgeräten ist es angezeigt, einige Unterbrechungen mit kleinerer und mittlerer Leistung durchzuführen.

Bei der Untersuchung eines Schalters mit magnetischer Blasung wurden die Versuche nach einer Pause von mehreren Wochen fortgesetzt. Die ermittelten Lichtbogendauerwerte waren 41,4—49,5—32,8—15,9—13,7—12,0 m/s. Es ist klar, daß es die Änderung der Beschaffenheit der Elektrodenoberflächen war, die die Verkürzung der Lichtbogendauer verursachte.

Erfolgt die Lichtbogenwanderung unter dem Einfluß des eigenen Magnetfeldes, so ist die auf die Längeneinheit wirkende Kraft

$$f = \frac{2,04 I^2}{s} \ln \frac{s-r}{r} 10^{-8} \quad [\text{kg/cm}] \quad (1)$$

wobei

r die Halbmesser der Schienen und

s die Entfernung zwischen den Schienen bedeutet.

Obzwar bei nahe nebeneinander liegenden großen Schienen kompliziertere Zusammenhänge gültig sind, ist es dennoch klar, daß die auf die Längeneinheit bezogene Kraft mit wachsendem s kleiner wird.

MÜLLER widmete sich der Berechnung der Induktion zwischen den Elektroden und trug die Verminderung der Induktion infolge Anwachsens

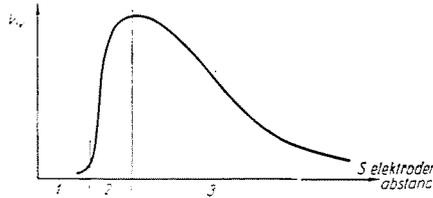


Abb. 4. Lichtbogengeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Elektrodenabstand

der Elektrodenentfernung auf. Diese Verminderung hängt von den Dimensionen ab.

Die Lichtbogengeschwindigkeit wird am häufigsten auf Grund eines aerodynamischen Vergleichs berechnet, so z. B. auch von O. P. BRON und ENGEL-STEENBECK. Mit diesem Vergleich läßt sich die Lichtbogenwanderung bei Elektrodenentfernungen über einigen Millimetern und bei großen Lichtbogengeschwindigkeiten gut verfolgen. Offenkundig muß die Lichtbogengeschwindigkeit bei abnehmender Elektrodenentfernung wachsen, da auch die durchschnittliche Induktion wächst. Die Lichtbogengeschwindigkeit wächst aber mit abnehmender Elektrodenentfernung, erreicht ein Maximum und fällt sodann stark zurück (Abb. 4).

Diese Erscheinung sowie die durch GUILÉ—SECKERT und HESSE festgestellte Tatsache, daß einem zunehmenden Strom eine konstante, ja sogar abnehmende Lichtbogengeschwindigkeit zugehört, lassen es als gerechtfertigt erscheinen, den Mechanismus der Lichtbogenfußpunktwanderung zu untersuchen.

Die Lichtbogenfußpunktspur auf viereckigen Elektroden

Die Bewegungsrichtung des auf Kupferschienen mit viereckigem Querschnitt wandernden Lichtbogens würde von O. B. BRON untersucht. Bei seinen Berechnungen ging er von folgenden Überlegungen aus: Nachdem die Metallschiene geschmolzen ist, befindet sich der Lichtbogen nicht genau in der Symmetrieachse der Schiene, sondern in einer Entfernung x_0 von ihr

(Abb. 5 und 6). Die einzelnen Stromfäden werden sich in der Schiene asymmetrisch verteilen. Außer der vertikalen Kraft F_y wird also noch eine horizontale Kraft F_x auftreten. Da große Schienen nahe nebeneinander liegen, erscheint die Berechnung der Feldstärke und daraus die Kräfte langwierig und würde selbst bei größeren Vernachlässigungen eine lange rechnerische Arbeit erfor-

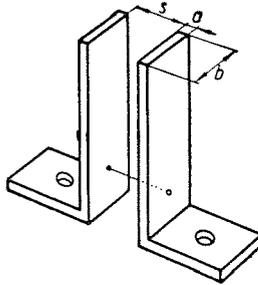


Abb. 5. Anordnung der Elektroden

dern. Nach den Berechnungen von BRON ist die seitlich gerichtete Kraft, sofern die Dichte der Schiene gegenüber ihrer Breite vernachlässigt wird,

$$F_x = \frac{I^2 \pi}{2b} \operatorname{tg} \frac{\pi}{b} x 10^{-8} \quad [\text{kg/cm}], \quad (2)$$

während sich die vertikale Kraft bei $x_0 = 0$ zu

$$F_y = \frac{I^2 \pi}{b} 10^{-8} \quad [\text{kg/cm}] \quad (3)$$

schreibt. Die Gleichung der Kurve, die Lichtbogenfußpunktspur beschreibt, kann berechnet werden, wenn man von der Annahme ausgeht, daß die Tangente der Kurve und die resultierende Kraft

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (4)$$

in ihrer Richtung übereinstimmen. Folglich ist

$$\frac{dx}{dy} = \frac{F_x}{F_y} = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \frac{\pi}{b} x, \quad (5)$$

und hieraus

$$y - y_0 = 2 \frac{b}{\pi} \ln \frac{\sin \frac{\pi}{b} x}{\sin \frac{\pi}{b} x_0}, \quad (6)$$

wobei y_0 und x_0 die charakteristischen Koordinaten der ursprünglichen Lage des Lichtbogenfußpunktes sind.

In Abb. 7 sind die für $x_0 = 0,1, 0,2, 0,3$ cm, bei $b = 4$ cm berechneten Kurven aufgetragen.

Wäre $x_0 = 0$, so würde sich der Lichtbogen längs der Symmetrieachse vertikal nach oben bewegen. Bei der geringsten Asymmetrie verschiebt sich

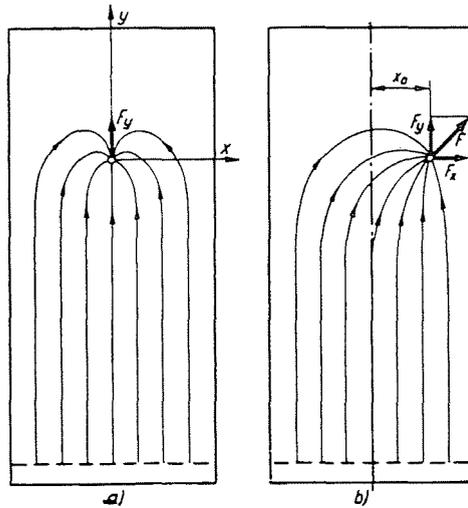


Abb. 6. Gestalt der Stromfäden, wenn
a) der Lichtbogenflußpunkt symmetrisch liegt,
b) wenn der Lichtbogenflußpunkt asymmetrisch liegt [1]

der Lichtbogen an die äußere Kante der Schiene. Aus Abb. 8 sind die Fußpunktspuren des Lichtbogens ersichtlich. Die durchschnittliche Lichtbogengeschwindigkeit beträgt $v \sim 0,15$ m/s. Die großen Schmelzkegel mit einer Höhe von ungefähr $0,5 \dots 0,6$ mm lassen sich klar erkennen.

Die Gestalt der Kurve stimmt mit der berechneten Kurve gut überein.

Will man nun untersuchen, bei welchem $y = y_m$ -Wert die Kurve die Schienenkante erreicht, so wird zunächst offenbar $x = x = b/2$ und hieraus bei $y_0 = 0$

$$y_m = 2 \frac{b}{\pi} \ln \frac{1}{\sin \frac{\pi}{b} x_0} . \quad (7)$$

Für die Kurven der Abb. 7 hat man damit

bei x_0	cm 0	0,1	0,2	0,3
ein y_m	cm ∞	6,6	4,8	3,8.

Die Tabelle zeigt, daß der Lichtbogen die Schienenkante schon bei einer geringfügigen Asymmetrie, z. B. bei $x_0 = 0,1$ cm, ungefähr in der Höhe der anderthalbfachen Breite erreicht.

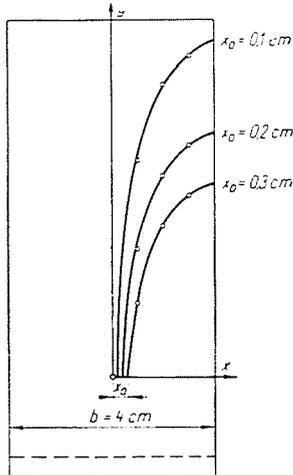


Abb. 7. Berechnete Fußpunktspuren für Verschiebungen von $x_0 = 0,1$ — $0,2$ und $0,3$ cm

Es sollen nun die ziffernmäßigen Daten an Hand eines Beispiels untersucht werden:

Breite der Sammelschiene $b = 4$ cm

Dicke der Sammelschiene $a = 0,4$ cm (wird hier nicht benützt, sondern vernachlässigt)

Strom $I = 3\,000$ A

Aus Formel (3) ergibt sich $F_y = 70,8$ gr/cm.

Aus Formel (2) ergibt sich gemäß Tabelle

bei $x = 0$	0,25	0,5	1	1,5	2 cm
ein $F_x = 0$	7,08	14,7	35,4	85,3	∞ gr/cm

Wie man sieht, verläuft die Tangente der Fußspur, bei Vernachlässigung der Sammelschienenstärke und bei $x = b/2$, d. h. also an der Schienenkante senkrecht auf die Kante.

Wird die Dicke der Schiene mit in Betracht gezogen, so wird der Ausdruck für F_y sehr kompliziert, während F_x nur durch graphische Integrierung ermittelt werden kann. Bei genauer Rechnung ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit den tatsächlichen Fußpunktspuren. Es kann auch festgestellt

werden, daß der Lichtbogen die Schienenkante bei einem um so höheren Wert y_m erreicht, je schmaler und je dicker die Schiene ist. Da bei der Berechnung der Abstand zwischen den Schienen nicht in Betracht gezogen wurde, werden die Werte der Feldstärke und der Kraftwirkung nur in unmittelbarer Nähe der Schienen ein genaues Bild geben.



Abb. 8. Fußpunktsuren des Lichtbogens bei starkem thermischem Einfluß, mit ungefähr 0,6 mm hohem Schmelzkegel

$$\begin{aligned} i &= 240 \text{ A} \\ s &= 0,6 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a &= 0,4 \text{ cm} \\ b &= 4 \text{ cm} \end{aligned}$$

Der zur Schienenkante hinauslaufende Lichtbogen kann die Wand der Löschkammer abbrennen. Diese Erscheinung ist daher bei der Ausgestaltung der Schaltgeräte zu beachten.

Eigene Untersuchungen

Die Untersuchungen wurden an Sammelschienen von 40×4 mm und 25×4 mm durchgeführt. Sie setzten sich das Ziel, die Charakteristiken der Fußpunktwanderung des Wechselstromlichtbogens zu ermitteln. Der bei den

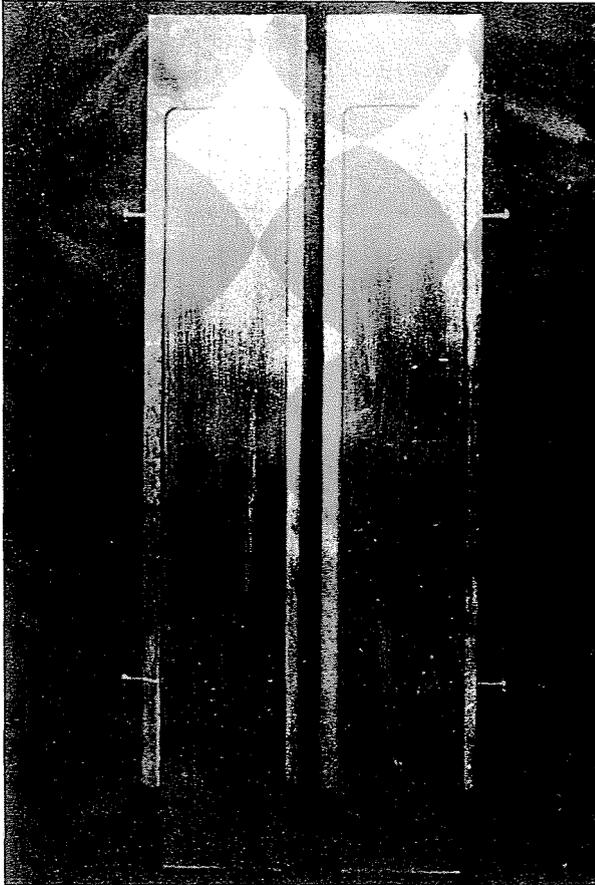


Abb. 9. Elektrodenanordnung zum Messen der Lichtbogengeschwindigkeit

Versuchen verwendete Strom hatte eine Stärke von $I = 240$ A. Die Anordnung der Elektroden geht aus Abb. 5 hervor. Sie standen lotrecht, so daß auch der thermische Auftrieb zur Geltung kam. In die Bohrungen der Elektroden wurden feine Silberdrähte angezogen, die durch den Strom in kürzester Zeit geschmolzen wurden. Der so entstandene Lichtbogen bewegte sich unter dem Einfluß des eigenen Magnetfeldes und des thermischen Auftriebes nach oben.

Die Lichtbogengeschwindigkeit wurde folgendermaßen gemessen. Laut Abbildung 9 wurde neben der Hauptelektrode in einem Abstand von ungefähr

0,1 mm von der Schienenkante eine Hilfselektrode montiert. Entsprechend der Abbildung 10 durchfloß die Netzspannung von 380 V folgenden Stromkreis: Drosselspule F , Stromwandler A , Nebenwiderstand 1, Hauptelektrode A ,

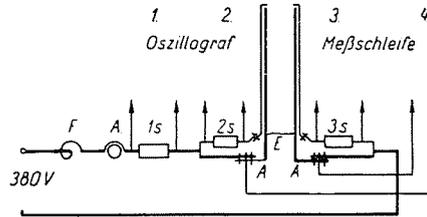


Abb. 10. Schaltung zum Messen der Lichtbogengeschwindigkeit

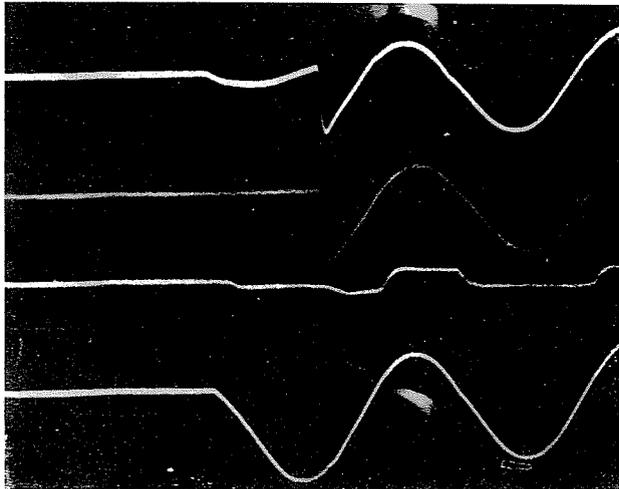


Abb. 11. Oszillogramm zum Messen der Lichtbogengeschwindigkeit

$$i = 216 \text{ A}$$

$$s = 0,3 \text{ cm}$$

$$a = 0,4 \text{ cm}$$

$$b = 2,5 \text{ cm}$$

$$v = 6,15 \text{ m/s}$$

Silberdraht e und zweite Hauptelektrode A . Der wandernde Lichtbogen gelangt an die Kante der Hauptelektrode und springt auf die Hilfselektrode über, so daß der Strom die beiden Nebenwiderstände 2 und 3 durchfließt. Die Entstehung des Lichtbogens wird durch die Schleife 1 und 4 des Oszillographen registriert, da Schleife 1 an den Klemmen des Nebenwiderstandes liegt, wogegen Schleife 4 die Lichtbogenspannung mißt. Die Schleifen 2 und 3 registrieren, wann der Lichtbogen auf die Hilfselektrode übersprungen ist. Es werden zwei Nebenwiderstände und zwei Schleifen benötigt, weil der Lichtbogen je nach der Polarität auf die Hilfselektrode auf verschiedene Weise überspringt. Auf diese Weise wird der Fehler vermindert und überdies ist auch die Möglich-

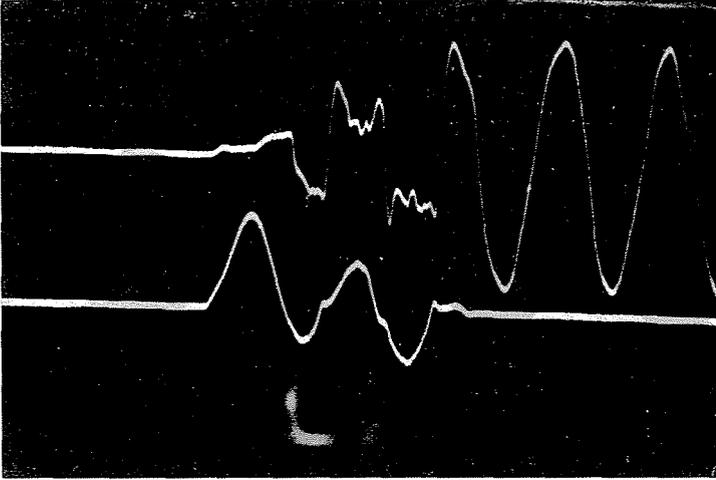
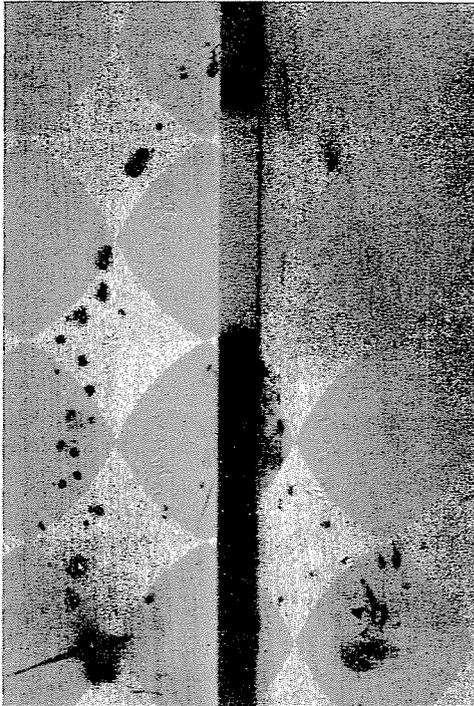


Abb. 12. a) Oszillogramm zum Messen der Lichtbogengeschwindigkeit



b) Fußpunktspur

$i = 216 \text{ A}$
 $s = 0,4 \text{ cm}$

$a = 0,4 \text{ cm}$
 $b = 2,5 \text{ cm}$

$v = 10,8 \text{ m/s}$

keit einer Kontrolle gegeben. Die Wanderung der Lichtbogenpunktes auf der Hauptelektrode läßt sich gut verfolgen, und ebenso kann der zurückgelegte Weg bestimmt werden. Da die Oszillogramme eine Zeitmessung ermöglichen, ergibt sich auch die Durchschnittsgeschwindigkeit. In Abb. 11 ist ein derartiges

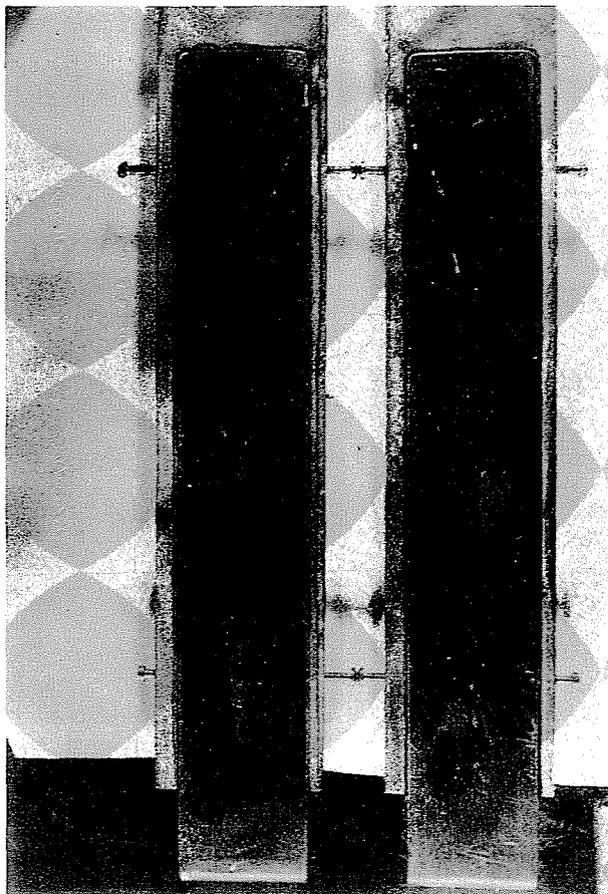


Abb. 13a. Spuren auf viereckigen Kupferelektroden bei schneller Lichtbogenwanderung

Oszillogramm zur Messung der Lichtbogengeschwindigkeit dargestellt. Die Lichtbogenlaufzeit betrug nach diesem Oszillogramm $t = 0,00975$ s, der zurückgelegte Weg 6 cm, die Durchschnittsgeschwindigkeit ergab sich also zu $v = 6,15$ m/s.

Es wurden zahlreiche Versuche mit verschiedenen Elektrodenabständen durchgeführt. Bei Wechselstrom können die Fußpunktspuren in drei grundlegende Bereiche eingeteilt werden.

1. Der Lichtbogen wandert mit großer Geschwindigkeit, d. h. $V_{\text{durschn.}} > 10 \text{ m/s}$. Kleine thermische Wirkung an den Elektroden, eine schwache, stetige Oxydation an der Kathode, schwarze Oxydflecke, jedoch keine Schmelzflecke an der Anode (Abb. 12, 13 und 9).

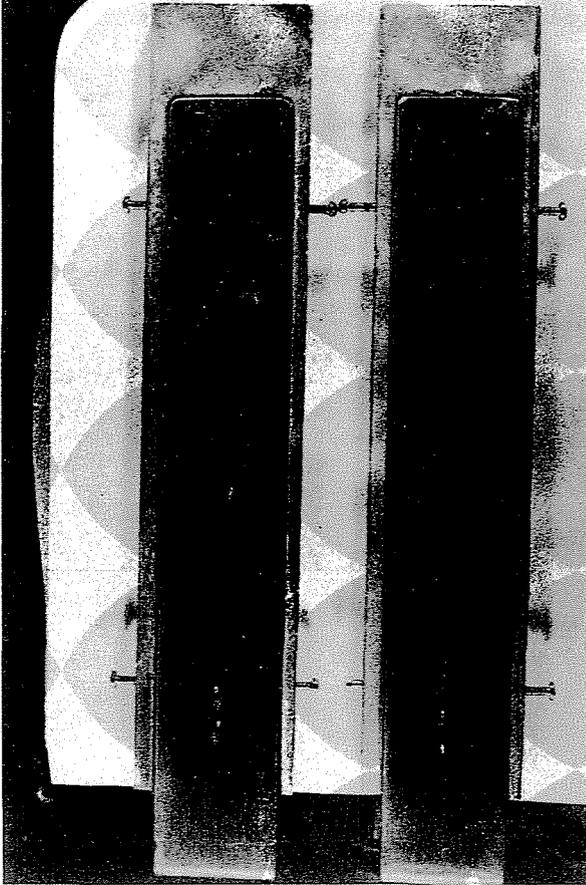


Abb. 13b. Spuren auf viereckigen Kupferelektroden bei schneller Lichtbogenwanderung

Hier soll eine Schwierigkeit erwähnt werden, die bei der Untersuchung mit Wechselstrom entsteht. Der Strom wurde nicht durch einen Synchronschalter unterbrochen, und dementsprechend sind fallweise asymmetrische Stromstöße vorgekommen, wie z. B. in dem Fall gemäß Abb. 12a. Die bei kleiner Stromstärke üblichen beiden Schmelzpunkte sind gut erkennbar. Sodann folgen die charakteristischen, stellenweise parallel gruppierten Oxydflecke. Sobald der Lichtbogen die Elektrodenkante erreicht hat, wird er plötzlich

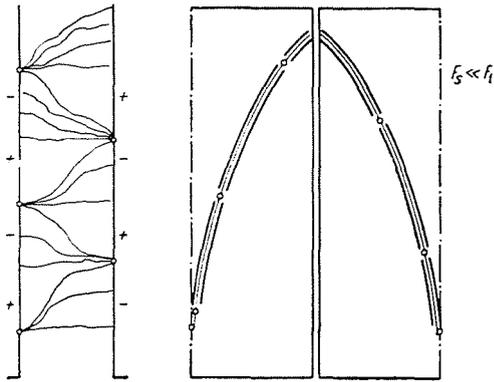
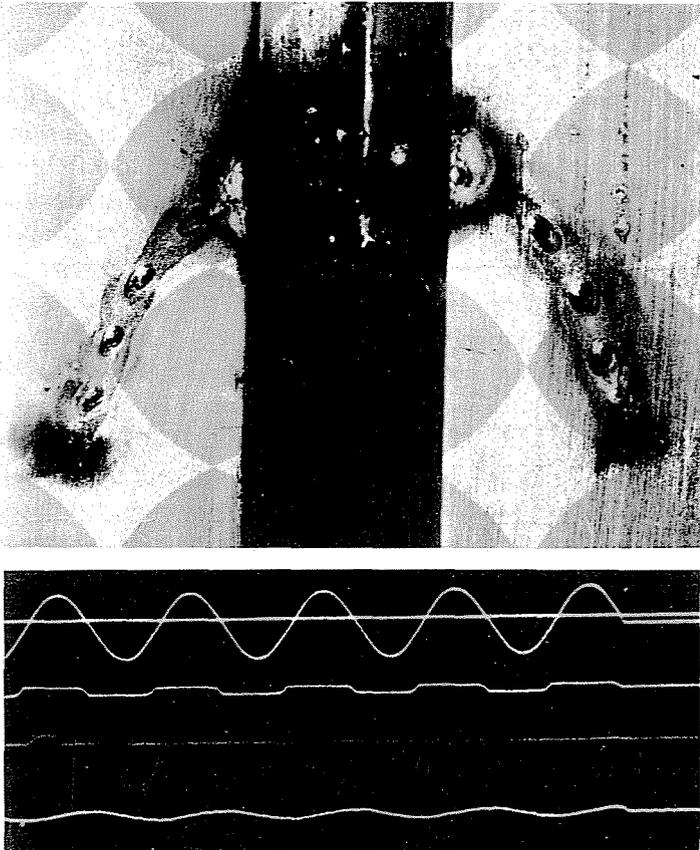


Abb. 15. a) Qualitatives Bild einer Lichtbogenwanderung kleiner Geschwindigkeit



b) Lichtbild und Oszillogramm einer Lichtbogenwanderung kleiner Geschwindigkeit

$$i = 216 \text{ A}$$

$$a = 0,4 \text{ cm}$$

$$b = 4 \text{ cm}$$

$$v = 0,319 \text{ m/s}$$

einer Geschwindigkeit von $v = 20$ m/s legt der Lichtbogen während einer Halbperiode 20 cm zurück und bei asymmetrischen Stromstößen noch mehr. Bei flachen Schienen erreicht der Lichtbogen die Schienenkante sehr oft noch vor dem Polaritätswechsel, wo sich die Verhältnisse ändern. Es kommt also nur selten vor, daß ein Polaritätswechsel an den gegenüberliegenden Flächen beobachtet werden könnte.

2. Der Bereich der mittleren Lichtbogengeschwindigkeiten, d. h. $v_{\text{durchschn.}} = 1 \dots 10$ m/s. Bei der Anodenfußpunktwanderung zeigen sich ausgeprägte Schmelzpunkte. Die auf den Lichtbogen wirkenden Kräfte sind groß genug, um den Anodenfußpunkt zu bewegen. Dies entspricht der Hesseschen Gruppe 3. Der Anodenfußpunkt bewegt sich sprunghaft, der Kathodenfußpunkt dagegen stetig. Diese Bewegungsart kann an der Abb. 14 mit folgenden charakteristischen Daten beobachtet werden: $i = 150$ A, $a = 0,3$ cm, $b = 1$ cm, $s = 0,3$ cm. Auf der Schiene links lassen sich in einer Halbperiode vier, auf der Schiene rechts drei Anodenfußpunkte beobachten.

3. Der Bereich der sehr langsamen Lichtbögen, d. h. $v < 1$ m/s. Die auf den Lichtbogen wirkenden Kräfte genügen nicht, um den Anodenfußpunkt zu bewegen. Solange die eine Schiene der anderen gegenüber positiv ist, bleibt der Anodenfußpunkt stehen, während sich der Kathodenfußpunkt auf der anderen Schiene ein wenig weiterbewegt. Nach dem Polaritätswechsel bildet sich ein neuer Anodenfußpunkt am Ende der Kathodenfußpunktspur, und diese Erscheinung setzt sich so fort. Es ist klar, daß eine derartige Wanderung nur bei Wechselstrom entstehen kann. In solchen Fällen entstehen große Schmelzkegel. Die Zeichnung in Abb. 15a gibt eine qualitative Erklärung.

Abb. 15b zeigt das Lichtbild der Fußpunktwanderung eines Lichtbogens in diesem Bereich. Hieraus ist nun klar, daß jeder Schmelzkegel einer Halbperiode entspricht. In diesem Bereich verursacht also die Bestimmung der Lichtbogengeschwindigkeit keine Schwierigkeiten. Die Entfernung d zwischen zwei aufeinander folgenden Schmelzkegeln wird der Lichtbogenfußpunkt in einer Halbperiode zurückgelegt. Nach dem Abklingen der Einschalt-Transiente ist daher

$$v = \frac{d}{T} = d^{\text{cm}} f \frac{1}{s} \quad [\text{cm/s}] \quad (8)$$

Die Lichtbilder beweisen, daß sich Fälle ergeben, in denen der Anodenfußpunkt nicht steht, sondern sich sehr langsam bewegt. An einer Aufnahme konnte z. B. beobachtet werden, daß der Anodenfußpunkt in einer Halbperiode eine ungefähr 0,2mal größere Strecke zurückgelegt hat als der Kathodenfußpunkt. Beachtenswert ist die Abb. 16, in der Fußpunkte der Gebiete 2 und 3 in einer Fußpunktwanderung zu sehen sind.

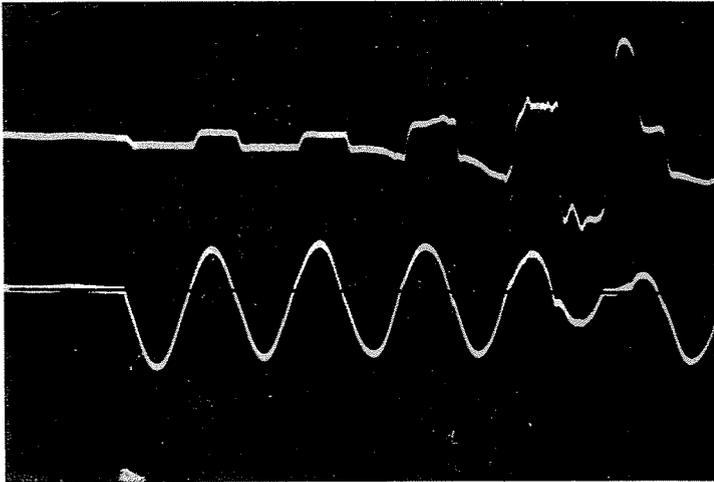


Abb. 16. a) Oszillogramm einer Lichtbogenwanderung kleiner Geschwindigkeit



b) Lichtbild einer Lichtbogenwanderung kleiner Geschwindigkeit

Folgerungen

Die Annahme, die auf den Lichtbogen wirkenden Kräfte hätten nur die durch Lichtbogendurchmesser und Geschwindigkeit bedingte Luftreibung zu überwinden, hat nur für einen Geschwindigkeitsbereich Gültigkeit. Allgemeiner ausgedrückt, ist die zur Wanderung des Lichtbogens erforderliche Kraft

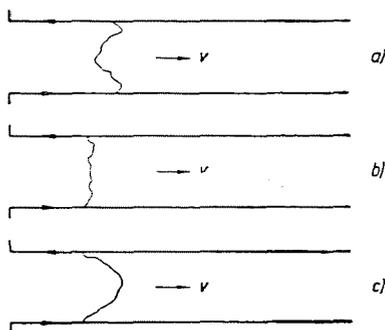


Abb. 17. Form des Lichtbogens bei

- | | |
|--------------|-------------------|
| a) großer | } Geschwindigkeit |
| b) mittlerer | |
| c) kleiner | |

$$F_m = F_s + F_t, \quad (9)$$

wobei

$$F_s = Kr v^2 \quad (10)$$

die zur Bewältigung der Luftreibung nötige Kraft ist, und

r den Halbmesser des Lichtbogens,

v die Geschwindigkeit des Lichtbogens und

K die Konstante bedeutet, in der der Einfluß der Luftdichte, der Erdbeschleunigung und der Form des Objektes zusammengefaßt sind.

F_t ist die zur Wanderung des Fußpunktes nötige Kraft, die sich aus den Kräften $F_a + F_k$, den für die Anode und für die Kathode nötigen Kräften zusammensetzt.

Die Kraft F_k ist im oxydiertem Zustand der Oberfläche genügend groß, nimmt aber nach dem »Einfahren« der Elektroden ab. Dementsprechend können für die drei Bereiche der Wechselstrom-Lichtbogenwanderung folgende qualitative Erklärungen gegeben werden:

1a. Bei schnellen Lichtbögen, d. h. bei $v > 20$ m/s und $F_s \gg F_t$ wird die Lichtbogengeschwindigkeit durch die Luftreibung bestimmt. Da einerseits

die Kraft genügend groß, andererseits die Feldstärke in der Nähe der Elektroden größer ist, als in der Mitte des Lichtbogens, bleibt der Lichtbogen gegenüber der Bewegung des Fußpunktes zurück (Abb. 17a).



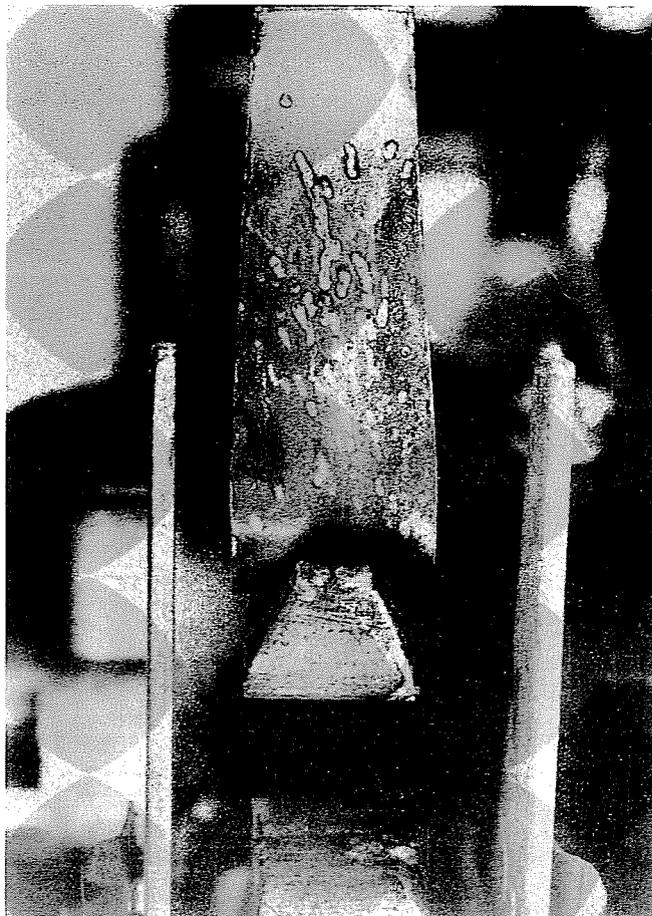
Abb. 18. Lichtbogenfußpunktspuren in einem Schalter mit magnetischer Blasung $i = 120$ A
 $\cos \varphi = 0,1$, $U = 380$ V bei einpoliger Abschaltung
 a) auf dem fixen Kontakt

1b. Bei mittleren Geschwindigkeiten, d. h. bei $v = 10 \dots 20$ m/s sind F_t und F_s ungefähr gleich, und der Lichtbogen selbst und sein Fußpunkt wandern zusammen (Abb. 17b).

2. Die kleinen Lichtbogengeschwindigkeiten, $v = 1 \dots 10$ m/s.

Dieser Bereich entspricht der Hesseschen Gruppe 3. Hier gibt es mehrere Anodenfußpunkte innerhalb einer Halbwelle. Der Kathodenfußpunkt wandert stetig, und es können Spuren thermischer Bean-

spruchung in der Umgebung der Fußpunktspuren beobachtet werden. In diesem Gebiet ist daher $F_s \ll F_t$. Der Lichtbogen eilt dem Fußpunkt hauptsächlich auf der Seite der Kathode voran, wobei er mit Hilfe von Überschlägen



b) auf dem beweglichen Kontakt

wandert. Innerhalb einer Halbwelle ergeben sich auf der Anode *mehrere* Schmelzflecke.

3. Bei ganz kleinen Lichtbogengeschwindigkeiten, d. h. $v < 1$ m/s ist $F_s \ll F_t$. Die treibende Kraft reicht nicht aus, um den Lichtbogen bis zum Überschlag zu verlängern. Der Anodenschmelzpunkt wandert sehr langsam, der Kathodenfußpunkt 3 ... 4mal schneller. Damit erreicht der Kathodenfußpunkt einen Vorsprung von ungefähr 4 ... 6 mm in einer Halbwelle. Nach dem Polaritätswechsel vertauschen die Elektroden ihre Rolle. Hiedurch wan-

dert der Lichtbogen mit einer für Wechselstrom bezeichnenden Bewegung, die am besten mit der Bewegung einer Spannraupe verglichen werden könnte. Zu einer jeden positiven Halbwelle gehört ein einziger Anodenfußpunkt, d. h. ein einziger Schmelzkegel.

Die Lichtbogengeschwindigkeit hängt von vielen Faktoren ab, so von der Beschaffenheit der Kathodenoberfläche, vom Phasenwinkel der Einschaltung, von der Gestalt und vom Abstand der Elektroden und von der Größe des Stromes.

Die Untersuchungen galten vor allem der Feststellung der Charakteristiken der Wechselstrom-Lichtbogenwanderung, wobei auch die Geschwindigkeitsbereiche annähernd festgelegt werden sollten. In naher Zukunft sollen jene Bedingungen eingehend untersucht werden, die die verschiedenen Formen der Lichtbogenwanderung bestimmen.

Es ist klar, daß ein richtig arbeitender Schalter nur mit einer Lichtbogenwanderung ausgelegt werden darf, die in die Bereiche 1 oder 2 fällt, da die langsame Wanderung der Gruppe 3 zu einem starken Abbrand der Kontakte führen würde. Die Untersuchung vieler Schalter nach der Unterbrechung führte zur Feststellung von Fußpunktspuren der Bereiche 1 und 2. An einem Schütz mit magnetischer Blasung waren Oxydflecke des Bereiches zu 1 sehen. In einem 1 000-A-Schalter wurden nach Abschaltung von ungefähr 6 000 A auf dem einen Kontakt schwarze Flächen, jedoch keine Schmelzspuren, auf dem zweiten hingegen Schmelzpunkte festgestellt. Die Lichtbogenwanderung konnte daher in den Bereich 2 eingereiht werden.

In Abb. 18 sind die Fußpunktspuren auf den Kontakten einer Schützes ersichtlich nach einer einpoligen Abschaltung von $i = 120$ A, $\cos \varphi = 0,1$ und $U = 380$ V. Die hier sichtbaren Spuren tragen denselben Charakter wie die auf parallelen Schienen beobachteten Spuren. Es können Oxydflecke (Wanderungsform 1), jedoch in geringer Zahl auch Schmelzflecke (Wanderungsform 2) beobachtet werden. Die starken Abbrände der Wanderungsform 3 sind dagegen nicht erkennbar.

Zusammenfassung

Der Verfasser gibt einen Überblick über die physikalischen Grundlagen und eine Zusammenfassung der Resultate ähnlicher Untersuchungen anderer Forscher. Sodann wird die Meßeinrichtung kurz beschrieben. Während die meisten Verfasser die Lichtbogengeschwindigkeit mit Gleichstrom gemessen haben, befaßt sich dieser Aufsatz mit der Wanderung des Wechselstrom-Lichtbogenfußpunktes. Aus den auf den Elektroden-Oberflächen hinterlassenen Spuren des Lichtbogenfußpunktes kann bei langsamer Wanderung auf die Lichtbogengeschwindigkeit geschlossen werden. Der Aufsatz befaßt sich mit dem Entstehen der Schmelzkegel sowie mit der Spur der Fußpunkte und beschreibt schließlich die charakteristischen Eigenschaften der Wechselstrom-Lichtbogenwanderung.

Bibliographie

1. BRON, O. B.: Elektritscheskaja duga w apparatah uprawlenije Gosenergoisdat, Moskau, Leningrad, 1954.
2. HESSE, D.: Über den Einfluß des Laufschienefeldes auf die Ausbildung von Lichtbogenfußpunktspuren. Arch. Elektrotech. **45**, 188 (1960).
3. HESSE, D.: Zur Bestimmung des Laufschienefeldes am wandernden Lichtbogen. Arch. Elektrotechn. **45**, 466 (1960).
4. HESSE, D.: Über den Einfluß des Laufschiene materials auf die Wanderungsgeschwindigkeit von Lichtbögen. Arch. Elektrotechn. **46**, 149 (1961).
5. GÖNENC, I.: Lichtbogenwanderung an runden Stäben. ETZ. A. **81**, 132 (1960).
6. NÖSKE, H.: Untersuchungen an kurzen Wechselstrombögen in Luft. Z. Angew. Phys. **10**, 327 und 382 (1958).
7. VEREBÉLY, L.: Villamos erőátvitel, IV. kötet, Műszaki Könyvkiadó, 1960. (Elektrische Kraftübertragung, Band IV, Technischer Buchverlag, Budapest 1960).
8. GUILLE, A. E.—SECKERT, P. E.: Arc Cathode Movement in a Magnetic Field. Applied Physics **29**, 1662 (1958).
9. DOMONKOS, S.: Kiszűlésű ívek oltása. (Löschung von Niederspannungs-Lichtbögen.) Elektrotechnika **53**, 503 (1960).
10. BABAKOW, N. A.: Rövid villamos ív mozgási sebessége. (Bewegungsgeschwindigkeit kurzer elektrischer Lichtbogen.) Elektritschestwo **7**, 74 (1948).
11. DOMONKOS, S.: Einfluß der magnetischen Blasung auf die Bogenlöszeit in Wechselstromschützen. Periodica polytechnica (elektrotechnik) **6**, 125 (1962)

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