

DIE BESTIMMUNG DER DEN LICHTBOGEN AN DIE LÖSCHBLECHE ANZIEHENDEN KRÄFTE

Von

S. DOMONKOS

Lehrstuhl für Hochspannungstechnik
und Elektrische Apparate, Technische Universität, Budapest

(Eingegangen am 3. Januar 1965)

Vorgelegt von Prof. Dr. J. EISLER

Einleitung

Nach erfolgter Trennung der Kontakte lassen sich bei den mit Deionblechen ausgestatteten Löschkammern folgende Erscheinungen beobachten:

1. Unter dem Einfluß der eisernen Deionbleche und des magnetischen Feldes des Stromweges nähert sich der Lichtbogen den Platten.
2. Der Lichtbogen wird durch die Deionbleche unterteilt.
3. Der Lichtbogen bewegt sich zwischen den Deionblechen.
4. Nach dem Nulldurchgang des Stromes erlischt der Lichtbogen.

Der Erfolg der Lichtbogenlöschung hängt weitgehend davon ab, ob es gelingt, den Lichtbogen an die Deionbleche herauszuführen. Es wird sich also lohnen, die Anziehungskraft, die den Lichtbogen an die Deionbleche zieht, einer gründlichen Untersuchung zu unterziehen. Die üblichen Berechnungsmethoden werden nachstehend kurz zusammengefaßt.

Befindet sich auf der einen Seite einer unendlichen Ebene, der sog. unendlichen Halbebene, Eisen, auf ihrer anderen Seite dagegen Luft, und in dieser ein Stromleiter, kann die Kraft nach der Spiegelungsmethode berechnet werden.

Nach KÜPFMÜLLER [1] wird zu diesem Zweck auf der anderen Seite der unendlichen Halbebene, im gleichen Abstand wie der ursprüngliche Strom ein fiktiver, sog. Spiegelbildstrom angenommen, so daß sich also die Kraftwirkung auf die zwischen zwei parallelen Leitern auftretende Kraftwirkung zurückführen läßt.

Die Berechnung der Größe des Spiegelbildstromes geht von der Voraussetzung aus, daß unter dem Einfluß des tatsächlichen und des Spiegelbildstromes eine mit der tatsächlichen übereinstimmende tangentiale Feldstärke und normale Induktionskomponente entstehen muß, wenn der Raum von Luft ausgefüllt ist.

Auf diese Weise ergibt sich der bekannte Zusammenhang für den Spiegelbildstrom

$$i_{sp} = i \frac{\mu - 1}{\mu + 1}.$$

d. h. der Spiegelbildstrom hängt von der relativen Permeabilität, dem Ausmaß der Sättigung ab.

Hierzu sei bemerkt, daß diese Berechnung nur dann richtig ist, wenn die Permeabilität im Eisen als konstant angenommen werden kann. Die Änderung der Permeabilität führt nach KÜPFMÜLLER in die Berechnung Schwierigkeiten ein, die sich auf rechnerischem Wege nicht lösen lassen.

Aus der Ableitung folgt, daß der Spiegelstrom, sofern sich der Stromleiter in Luft befindet, das gleiche Vorzeichen aufweist wie dieser und daher an das Eisen angezogen wird, daß dagegen in Richtung gegen das Innere des Eisens eine abstoßende Kraft auftritt, wenn sich der Stromleiter im

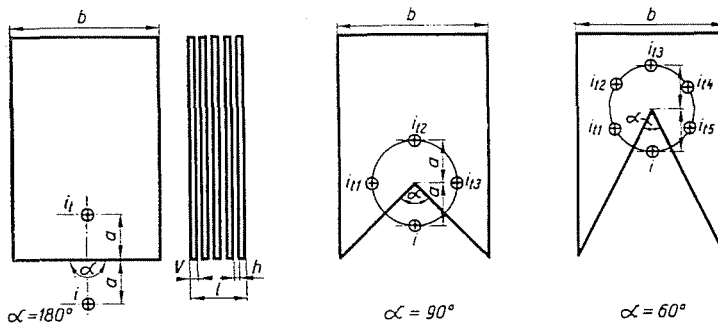


Abb. 1. Spiegelbildströme und die zur Berechnung dienenden Formeln bei verschiedenen Löschblechformen

Eisen befindet. Mit der Kraft, durch die der Lichtbogen an die Eisenplatten angezogen wird, befaßten sich hauptsächlich BRON [2] und BURKHARD [3, 4, 5].

Die auf die Längeneinheiten wirkende Kraft steigt an, wenn man die Platte mit einem Einschnitt versieht. Wie bekannt, läßt sich das Spiegelungsverfahren nur dann anwenden, wenn der Einschnittswinkel $\alpha = \frac{\pi}{m}$ beträgt,

wobei m eine ganze Zahl bedeutet.

Das System der Spiegelbildströme und die der Berechnung zugrunde liegenden Formeln können nach BRON der Abb. 1 entnommen werden.

Die auf der Spiegelung beruhende Berechnungsmethode bedarf einer Vervollkommnung aus folgenden Gründen:

1. Bei schwankender Permeabilität im Eisen, können selbst die Sättigungsverhältnisse nicht genau berücksichtigt werden.
2. Die Wirkung der Plattenpaketausfüllung auf die Anziehungskraft läßt sich nicht einfach bestimmen.
3. In der Formel kommt nur eine einzige Abmessung, der Abstand von der Platte vor. Die Kraft wird auch durch die Zahl der Platten, durch

die Plattenbreite sowie durch die Länge des Plattenpakets beeinflusst. Es ist von Nutzen zu wissen, wie hoch dieser Einfluß ist.

4. Reicht der den Lichtbogen symbolisierende Kreiszyylinder bis an den Plattenrand heran, oder ist sein Halbmesser groß, ist die Spiegelung zur Berechnung der Kraft nicht mehr geeignet, obwohl eben in diesem Abschnitt in der Nähe der Platten die Kenntnis der den Lichtbogen beeinflussenden Kraft sehr wichtig ist.

Nach diesen Gesichtspunkten waren wir bestrebt, ein Meßverfahren auszuarbeiten, das die Messung der Kräfte ermöglicht.

Beschreibung der Meßvorrichtung

Die Meßvorrichtung wurde aus einer analytischen Waage zusammengestellt. Die Deionbleche wurden an dem einen Balkenende der Waage

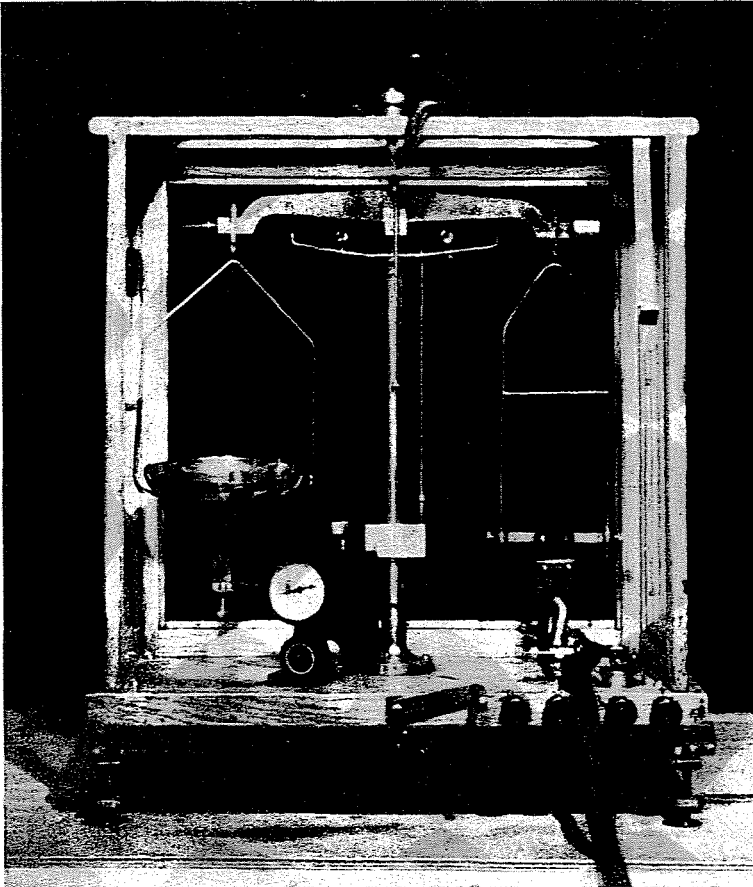


Abb. 2. Lichtbild der Meßeinrichtung

befestigt und mit der Gewichtsschale ausbalanciert. Den elektrischen Lichtbogen symbolisierte ein an der Grundplatte der Waage befestigter kupferner Leiter.

Der vom Leiter gemessene Abstand » a « konnte mit einem Plexiglaszylinder eingestellt werden. Beim Einschalten des Gleich- oder Wechselstromes legte sich das Plattenpaket unter Einfluß der Kraft an den Halbzylinder aus Plexiglas an. Hierauf wurde der am Boden der Gewichtsschale befestigte Arm durch einen Kraftmesser Correx, der mit Hilfe eines Exzentrers bewegt werden konnte, so lange einer Kraftbeanspruchung ausgesetzt, bis die Platten in Bewegung gerieten. Die Kraftgrößen wurden vom Maximumzeiger des Kraftmessers abgelesen.

Die Vorrichtung wurde vor jeder Meßreihe geeicht, indem auf die Deionbleche ein Gewicht von 10 g aufgesetzt und mithin die Kraft stromlos bestimmt wurde. Abb. 2 zeigt die Meßvorrichtung.

Meßergebnisse

a) Einfluß der Plattenbreite auf die Anziehungskraft.

Die Meßwerte für $a = 180^\circ$, d. h. für quadratische Platten unterschiedlicher Breite sind in Abb. 3 zusammengefaßt.

Es ist sowohl theoretisch einleuchtend als auch durch die Messungen bewiesen, daß die auf den Lichtbogen wirkende Kraft besonders bei größeren Abständen, bei $a = 1-2$ cm, durch die Plattenbreite wesentlich beeinflußt wird.

Aus Abb. 4 gehen die berechneten und gemessenen Werte der Kraftwirkungverhältnisse von $b = 4,0$, $b = 2,5$ cm und $b = 1,5$ cm breiten Platten, d. h. die Werte $\frac{F_{40}}{F_{15}}$ und $\frac{F_{40}}{F_{25}}$ hervor. Die Berechnungen liefern ein qualitativ gutes Bild, ja bei einigen Abständen ist die Annäherung auch quantitativ gut.

Setzt man zum Beispiel beim Abstand $a = 1$ cm die auf die $b = 1,5$ cm breite Platte wirkende Kraft zu 1 an, erhält man bei $b = 2,5$ cm eine 1,4mal, bei $b = 4$ cm eine 2,3mal größere Kraft. Dies ist insbesondere wegen der Lichtbogenbewegung von Bedeutung.

Das Spiegelbildstromsystem der in der Praxis am häufigsten anzutreffenden Fälle mit 90° igem Einschnittwinkel a ist sehr verwickelt, die rechnerische Ermittlung der Kräfte erweist sich als umständlich, weshalb in Abb. 5 nur die nach unserer Methode gemessenen Werte aufgenommen sind. Wie ersichtlich, ändern sich die Kräfte je nach der Plattenbreite auch hier sehr erheblich.

Die Kraftverhältnisse der 4, 2,5 und 1,5 cm breiten Platten zeigt für $a = 90^\circ$ und verschiedene Plattenzahlen die Abb. 6. Aus unseren Messungen

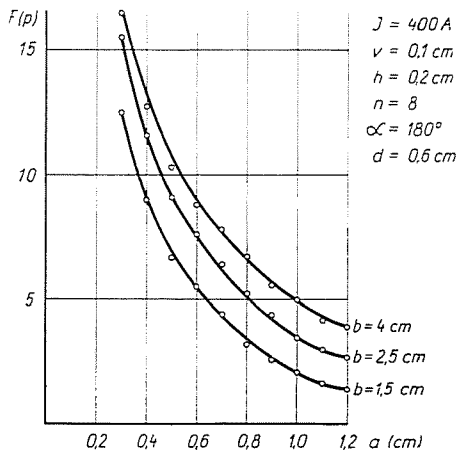
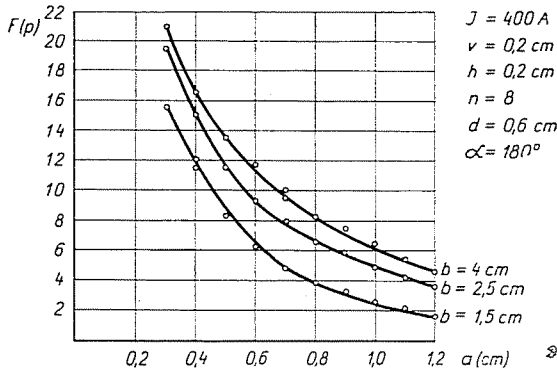
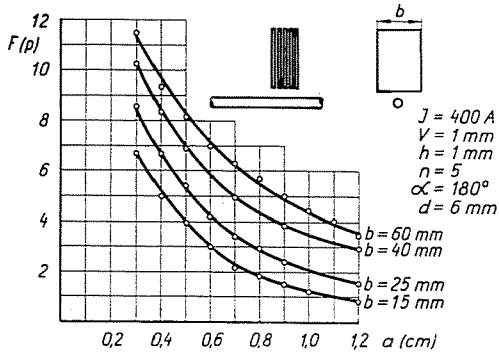


Abb. 3. Gemessene Kraftwerte in Abhängigkeit vom Abstand bei verschiedenen Plattenbreiten

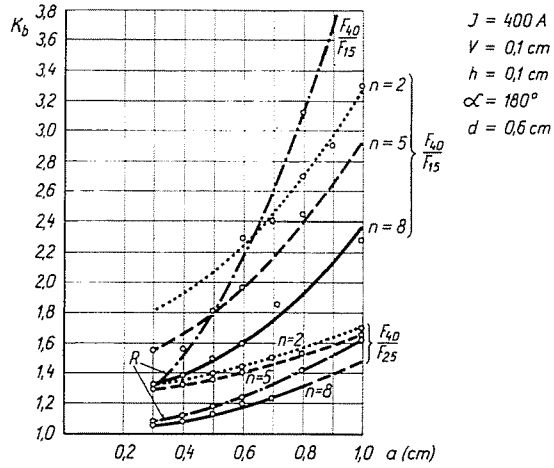


Abb. 4. Berechnete und gemessene Werte der Kraftwirkungsverhältnisse $\frac{F_{40}}{F_{25}}$ und $\frac{F_{40}}{F_{15}}$
 $\alpha = 180^\circ$

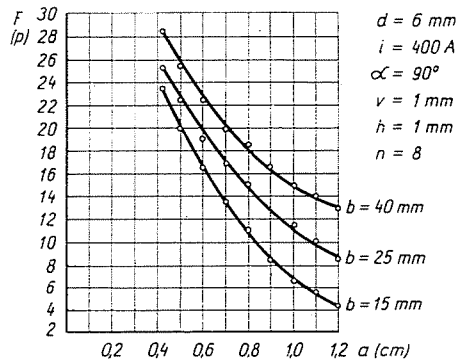
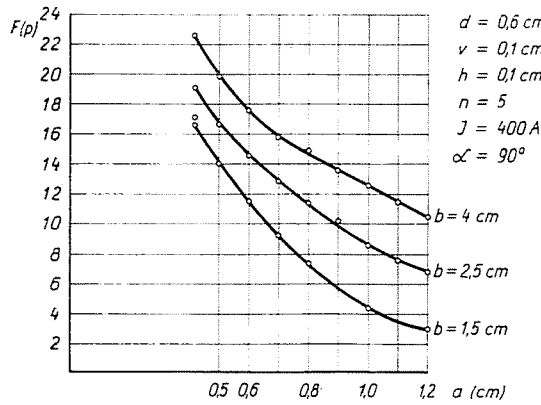


Abb. 5. Gemessene Kraftwerte in Abhängigkeit vom Abstand bei verschiedenen Plattenbreiten, $\alpha = 90^\circ$

geht hervor, daß der Relativwert der Kraft beim Abstand $a = 1$ cm unter der Annahme, daß die Kraftwirkung der $b = 1,5$ cm breiten Platte gleich Eins ist, bei $b = 2,5$ cm ungefähr 1,5, bei $b = 4$ cm etwa 2,2 beträgt.

b) Der Einfluß des Plattenpaket-Ausfüllungsfaktors auf die Anziehungskraft wurde mit der Meßvorrichtung gleichfalls untersucht. In der Fachliteratur gibt BRON [2] einen Beiwert an, mit welchem man den Ausfüllungsfaktor zu multiplizieren hat, um richtige Ergebnisse zu erhalten. Beim Aus-

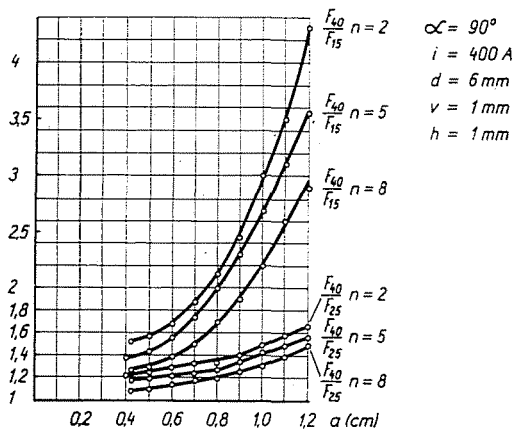


Abb. 6. Gemessene Werte der Kraftwirkungsverhältnisse $\frac{F_{40}}{F_{15}}$ und $\frac{F_{40}}{F_{25}}$ ($\alpha = 90^\circ$)

füllungsfaktor $\sigma = 0,5$ $\gamma = 1,5$. Zweckmäßig wird man diesen Wert durch Messung bestimmen.

Die Meßwerte können der Abb. 7 entnommen werden. Es ist interessant zu beobachten, daß die Anziehungskraft — wie aus Abb. 8 ersichtlich —, während der Ausfüllungsfaktor von 1 bis 0,2 sinkt, lediglich auf das 0,8fache abnimmt. Mit guter Näherung kann der in der Formel der Kraftwirkung den Ausfüllungsfaktor berücksichtigende Beiwert zu

$$K_i \simeq \sqrt[6]{\sigma} \tag{1}$$

angesetzt werden.

Dieser Beiwert ist ziemlich wichtig, weil die Anziehungskraft mit dem Ausfüllungsfaktor nur langsam, der die Bewegung des Lichtbogens hindernde Widerstand hingegen stark abnimmt. Auf dieser Grundlage läßt sich eine optimale Löschkammer zustandebringen, die den Lichtbogen mit einer ausreichend großen Kraft anzieht und seiner Bewegung einen verhältnismäßig kleinen Widerstand entgegensetzt.

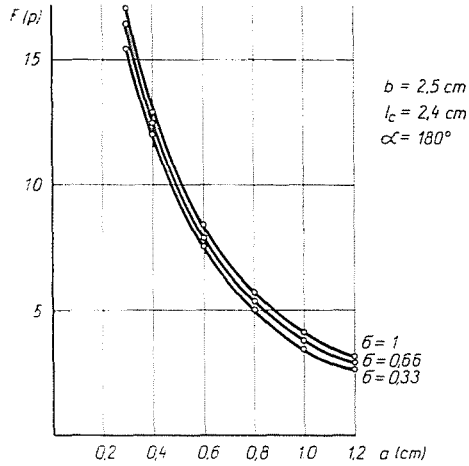
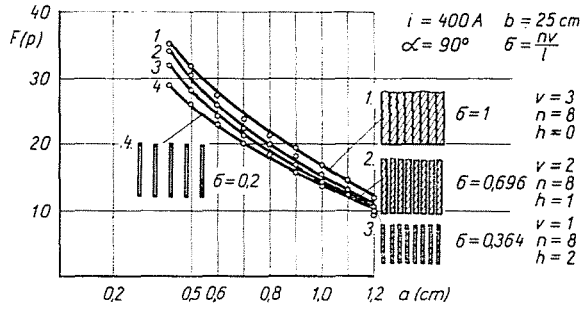


Abb. 7. Gemessene Kraftwerte in Abhängigkeit vom Abstand bei verschiedenen Ausfüllungsfaktoren

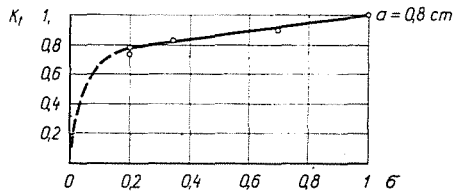


Abb. 8. Faktor K_t in Abhängigkeit vom Ausfüllungsfaktor

c) Die Wirkung der Plattenanzahl auf die Anziehungskraft. Der Einfluß der Plattenanzahl wurde für zwei Fälle untersucht.

Im ersten Fall war der den Lichtbogen symbolisierende Stromleiter länger als das Plattenpaket. Die in Abhängigkeit von der Plattenanzahl

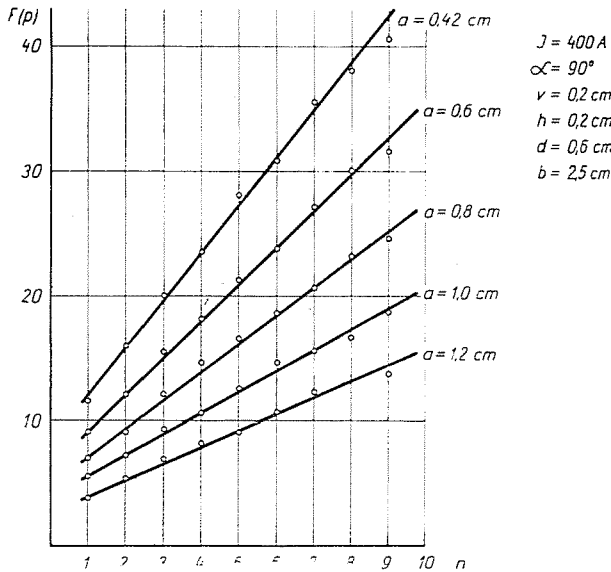
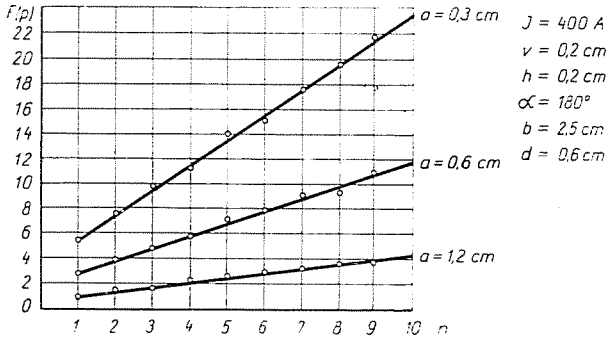


Abb. 9. Gemessene Kraftwerte in Abhängigkeit von der Blechzahl

gemessenen Kräfte sind in Abb. 9 aufgetragen. Die Untersuchungen wurden, wie aus der Abb. 9 hervorgeht, für Plattenzahlen von 1 bis 10 durchgeführt. Die Abb. 9 zeigt, daß sich schon bei einer Platte eine große Kraft ergibt, die dann in Abhängigkeit von der Plattenzahl nahezu linear anwächst.

Zur Erklärung der Krafteinflußgestaltung kann angenommen werden, daß infolge der am Ende des Plattenpakets auftretenden magnetischen

Streuung am Ende des Plattenpakets eine Kraftwirkung entsteht. Diese bezeichnen wir als *Endkraft*.

Die Richtigkeit dieser Annahme wird auch dadurch bekräftigt, daß die Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Werten mit steigender Plattenzahl (Paketlänge l_c) immer kleiner werden (Abb. 10), unseres

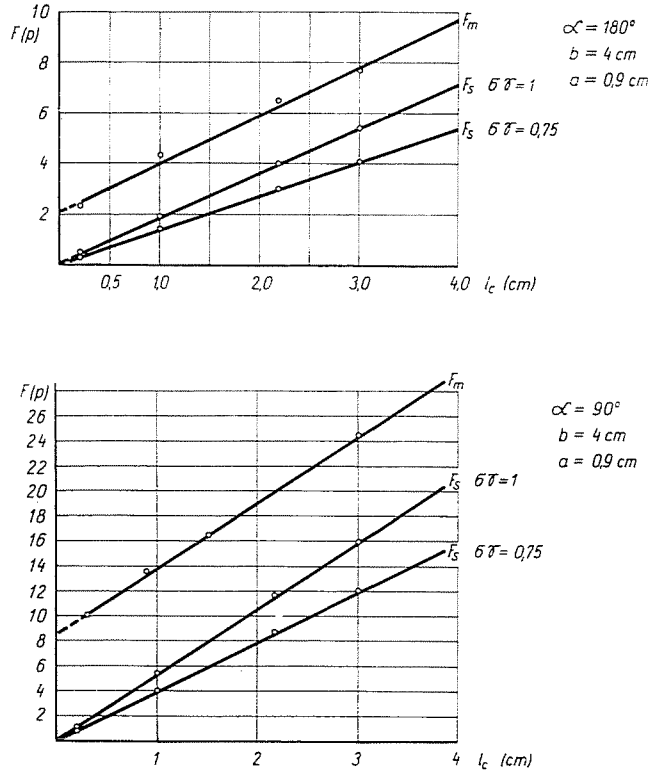


Abb. 10. Gemessene (1) und berechnete (2, 3) Kraftwerte in Abhängigkeit von der Paketlänge

Erachtens deshalb, weil der Einfluß der Endkraft im Vergleich zur Gesamtkraftwirkung stets geringer wurde.

Die annahmegemäß vorhandenen Endkräfte wurden folgendermaßen bestimmt. An 1–4 mm dicken Platten einer bestimmten Form, z. B. mit $\alpha = 90^\circ$ und $b = 25 \text{ mm}$, wurde die Anziehungskraft in Abhängigkeit vom Abstand und von der Plattenbreite gemessen. Die Meßpunkte lagen in sämtlichen Fällen auf einer Geraden. Auf diesen Geraden wird der der Dicke $V = 0$ zugeordnete extrapolierte Wert die angenommene Endkraft sein. Eine derartige Endkraftbestimmung kann der Abb. 11 entnommen werden. Auf diese Weise erhält man die Endkräfte bei $i = 400 \text{ A}$ (Abb. 12) in Abhängig-

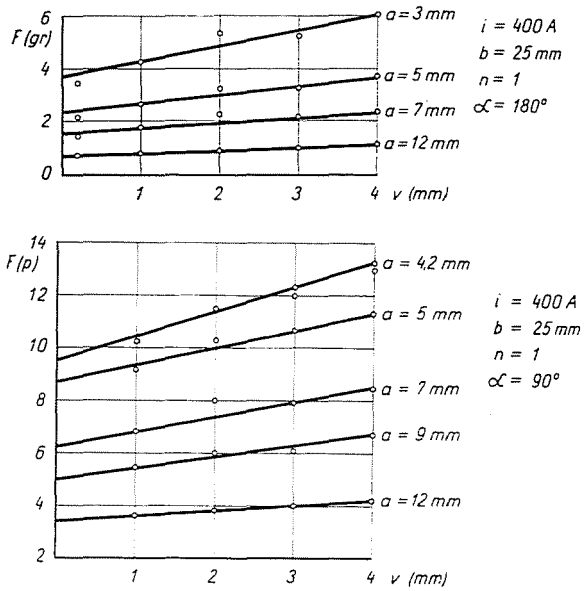


Abb. 11. Gemessene Kraftwerte in Abhängigkeit von der Blechdicke bei verschiedenen Abständen

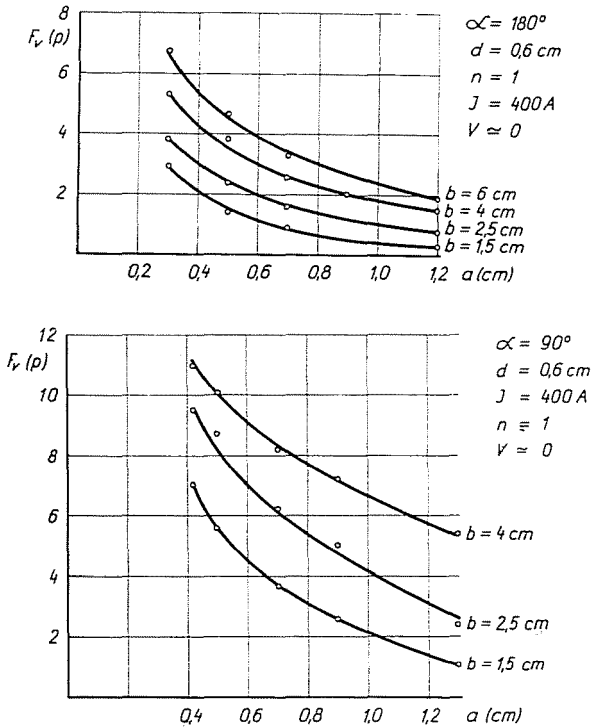


Abb. 12. Endkräfte in Abhängigkeit vom Abstand bei verschiedenen Plattenbreiten

keit von den verschiedenen Parametern sowie von der Plattenbreite, vom Lichtbogenabstand und Einschnittwinkel $\alpha = \frac{\pi}{m}$ zu

$$F_c \simeq \frac{0,5b}{a} (2m - 1) (p).$$

Danach wurde nachstehender Versuch unternommen. Die Kräfte wurden mit Hilfe der Spiegelungsmethode berechnet, sodann wurden die »Endkräfte« den erhaltenen Werten hinzuaddiert. Wie aus Abb. 12a ersichtlich, erhält man einen ausreichend nahe am Meßwert liegenden Wert, sofern die Endkraft, $F_c = 2p$ bei $\alpha = 180^\circ$, mit dem errechneten Wert addiert wird. Daraus folgt, daß als einer der Hauptgründe für die zwischen Berechnung und Messung bestehende Abweichung die endliche Länge des Plattenpakets anzusehen ist. Der andere praktisch wichtigere Fall ist gegeben, wenn die Lichtbogenlänge der Länge des Plattenpakets gleich oder kürzer als diese ist.

Der Modellversuch eignet sich auch zur schnellen Bestimmung des Einflusses *anderer Parameter*, wie etwa den Einfluß der auf den Lichtbogen wirkenden elektromagnetischen Anziehungskraft in Abhängigkeit von der Frequenz. Dieses Thema ist bei den auf der Frequenz von $f = 2000$ Hz arbeitenden Schaltgeräten der Speiseeinrichtungen von Öfen bedeutungsvoll.

Bei gegebener Frequenz bzw. bei vorgegebenem Strom und Lichtbogenabstand wird z. B. die Kraft durch die numerische Lösung eines elliptischen Integrals und durch Planimetrieren ermittelt. Diese Untersuchungen können mit Hilfe des Modellversuches bequem und schnell durchgeführt werden. Das erörterte Meßverfahren ermöglicht es, die den elektrischen Lichtbogen beeinflussenden elektromagnetischen Kräfte mit besserer Annäherung zu ermitteln, als nach der von vereinfachten Zuständen ausgehenden Spiegelungsmethode. Es gestattet auch Dreidimensionsuntersuchungen statt der Zweidimensionsuntersuchungen. Das Meßverfahren liefert Zahlenwerte, seine Bedeutung liegt aber vielleicht eher in der Möglichkeit zu Vergleichen zwischen den verschieden geformten Löschkammern.

Ogleich die Strömungserscheinungen in dem den Lichtbogen umgebenden, auf hohe Temperaturen erhitzten Gases auf die Bewegung eine erhebliche Wirkung ausüben, gestattet die Methode, über die wichtigste der den Lichtbogen bewegendes Kräfte mehr als bisher zu erfahren.

Über die zahlenmäßige Bestimmung der von verschiedenen Parametern bestimmten Kraftwirkungen hinaus, eignet sich das Meßverfahren auch zum Universitätsunterricht an Einrichtungen selbst. Da die Meßvorrichtung einfach ist und die Ergebnisse gut reproduziert werden können, wurden diese Messungen vom Lehrstuhl für Hochspannungstechnik und Elektrische Apparate der Budapester Technischen Universität in das Meßprogramm mit elektrischen Apparaten aufgenommen.

Zusammenfassung

Es werden die gebräuchlichen Berechnungsmethoden zur Bestimmung der zwischen Lichtbogen und Löschblechen auftretenden Kraftwirkungen bzw. eine Einrichtung zur Messung der Kraftwirkung beschrieben, in der den Lichtbogen ein massiver Metallleiter ersetzt und die Kraft mit einer Waage gemessen wird. Die Kraft wird durch die Plattenzahl, die Plattenbreite, die Länge und Ausfüllung des Plattenpakets beeinflusst. Die Meßergebnisse werden mit den Berechnungsergebnissen verglichen und ausgewertet.

Literatur

1. KÜPFMÜLLER, K.: Einführung in die theoretische Elektrotechnik. Springer Verlag, Berlin 1962.
2. BRON, O. B.: Električeskaja duga v apparatach upravlenijje, Energoizdat, Moskau—Leningrad 1954.
3. BURKHARD, G.: Ein Beitrag zur Lichtbogenwanderung auf ferromagnetischen Flächen-elektroden, *Elektrie*, **15**, 363 (1961).
4. BURKHARD, G.: Untersuchungen über das Lichtbogenverhalten in Löschblechkammern, *Elektrie*, **14**, 424 (1960).
5. LOH, O.: Verhalten des Wechselstromlichtbogens bei Niederspannungs-Schaltgeräten. *ETZ*, **A. 82**, 748 (1961).
6. DOMONKOS, S.: Einfluß der Wechselstrom-Lichtbogenwanderung auf die Elektroden. *Periodica Polytechnica*, **6** (1962).
7. DOMONKOS, S.: Über die zwischen den Deionlöschblechen und dem Lichtbogen auftretenden Kräfte. *Periodica Polytechnica* **8** (1964).

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