

ÜBER DIE ZWISCHEN DEN DEIONLÖSCHBLECHEN UND DEM LICHTBOGEN AUFTRETENDEN KRÄFTE

Von

S. DOMONKOS

Lehrstuhl für Hochspannungstechnik und Elektrische Apparate, Technische Universität, Budapest

(Eingegangen am 14. September 1963)

Vorgelegt von Prof. Dr. J. EISLER

Einleitung

Deion-Lichtbogenlöschbleche aus Eisen sind sozusagen in allen Niederspannungsschaltern zu finden. Bei der Lichtbogenlöschung und beim Abbrand spielen sie eine wesentliche Rolle, es ist daher begründet, die Vorgänge, die sich in den Löschkammern mit Deionlöschblechen abspielen, so gut wie möglich kennenzulernen. Der Erfolg der Lichtbogenlöschung hängt weitgehend davon ab, ob es möglich ist, den Lichtbogen zu den Deionlöschblechen hinzu-zwingen. Es lohnt sich daher, die Kraft, die ihn an die Deionlöschbleche anzieht, zum Gegenstand eingehender Untersuchungen zu machen. Im folgenden befassen wir uns mit der Berechnung dieser Kraft. Da die Berücksichtigung der magnetischen Streuung und die komplizierte Form des Deionlöschbleches die Berechnung erschwert, wurden die Kräfte — in einem Modellversuch — durch Messung bestimmt.

Die Berechnung der Anziehungskraft

Befindet sich der elektrische Lichtbogen in der Achse des Deionlöschbleches, so wirkt auf ihn in Seitenrichtung keine Kraft. Die Richtung der Kraftwirkung fällt mit der Plattenachse zusammen. Zur Bestimmung der Kraft zwischen der einfachsten Form, des rechteckigen Deionlöschbleches und dem Lichtbogen bietet die Spiegelungsmethode eine Möglichkeit. Wie aus Abb. 1 ersichtlich, befindet sich der Spiegelbildstrom in gleicher Entfernung a von den Rändern des Deionlöschbleches. Die Stromstärke des Spiegelbildes „ i_i “ ist abhängig von der Sättigung, ihr Wert wird nach KÜPFMÜLLER aus der Beziehung

$$i_i = i \frac{\mu - 1}{\mu + 1} \quad (1)$$

bestimmt, wobei μ die relative Permeabilität des Eisens bedeutet.

Fließt der ursprüngliche Strom in der Luft, dann hat der Spiegelbildstrom das gleiche Vorzeichen, d.h. die beiden Ströme üben aufeinander eine

anziehende Wirkung aus. Fließt der Strom im Eisen, dann liegt der Strom des Spiegelbildes in der gleichen Entfernung a von den Rändern der Platte, doch hat er in diesem Falle das entgegengesetzte Vorzeichen. Demgemäß stoßen sich die beiden Ströme ab, und deshalb verhindert diese Kraft die Entfernung des Lichtbogens vom Eisen.

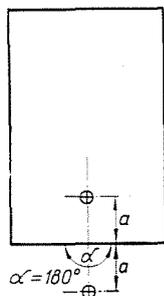


Abb. 1. Spiegelbildstrom bei viereckigen Blechen

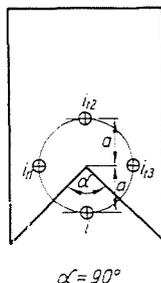


Abb. 3. Spiegelbildströme bei Blechen mit Einschnitt, $\alpha = 90^\circ$

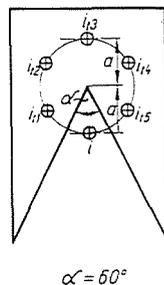


Abb. 4. Spiegelbildströme bei Blechen mit Einschnitt, $\alpha = 60^\circ$



Abb. 2. Bleche in Seitenansicht

Dementsprechend bedeutet die Anziehungskraft zwischen den beiden Strömen

$$f = 2,04 i i' \frac{1}{2a} 10^{-5} [\text{g/cm}] \quad (2)$$

ein für alle Mal die Kraft, die den Lichtbogen zur Deionplatte hinzieht.

Da in Löschkammern mit Deionlöschblechen zwischen den Eisenplatten ein Luftspalt vorhanden ist, wird die Kraft für eine Kammer (Abb. 2)

$$F = 1,02 \frac{i i'}{a} l \sigma 10^{-5} [\text{g}], \quad (3)$$

wenn σ den Wert des Füllfaktors im Sinne der Beziehung

$$\sigma = \frac{nv}{l} \quad (4)$$

und n die Anzahl der in der Löschkammer befindlichen Deionlöschbleche bezeichnet. Der Wert von σ bewegt sich meist um 0,5, da die Dicke des Luftspaltes häufig gleich der der Eisenplatte ist.

Die Beziehung (3) liefert ohne Berücksichtigung der magnetischen Streuung zahlenmäßig kein gutes Resultat. Daher ist in der Beziehung für die Kraftwirkung

$$F = 1,02 \frac{i i_t}{a} l \sigma \gamma 10^{-5} [\text{g}] \quad (5)$$

$\gamma > 1$. In seiner Untersuchung über diese Kraft setzt O.B. BRON den γ -Wert mit 1,5 an. Die vorstehende Berechnung und die im folgenden anzugebenden Beziehungen berücksichtigen jedoch die an den Enden des Blechpakets auftretende Streuung nicht, d. h. sie beziehen sich auf sehr lange Plattenpakete.

Die an beiden Enden des Blechpaketes auftretende Streuung beeinflusst die Kraftwirkung in hohem Maße.

Für die Praxis sind die Deionlöschbleche mit Einschnitt von Bedeutung. Es ist wichtig, hier zu bemerken, daß die Spiegelungsmethode nur dann brauchbar ist, wenn in der Beziehung für den Einschnittwinkel

$$\alpha = \frac{\pi}{m} \quad (6)$$

m eine ganze Zahl ist. In diesem Fall wird der wirkliche Strom i $2m-1$ Spiegelbilder haben, die längs eines Kreises mit dem Radius a gleichmäßig verteilt erscheinen.

Das den Platten mit dem Ausschnitt $\alpha = 90^\circ$ entsprechende Spiegelbild ist in Abb. 3 dargestellt. Es fällt sofort auf, daß — da es mehrere Spiegelbilder gibt — auch die Anziehungskraft größer sein wird.

Das Spiegelungsverfahren nimmt folgenden Gang.

Projiziert man zunächst den wirklichen Strom auf die eine Seite, ergibt sich dort der Strom

$$i_{t_1} = i \frac{\mu - 1}{\mu + 1}. \quad (7)$$

Nun muß der wirkliche und der bereits projizierte Strom i_{t_1} über die verlängerte andere Seite des Einschnittes gespiegelt werden. Der Strom i_{t_2} ist also das Spiegelbild des Stromes i_{t_1} , sein Wert daher

$$i_{t_2} = i \left(\frac{\mu - 1}{\mu + 1} \right)^2. \quad (8)$$

Der Wert von i_{t_3} stimmt mit dem von i_{t_1} überein. Die Kraftwirkung zwischen dem wirklichen und dem Strom 2 wird dann

$$f_{02} = 2,04 i^2 \left(\frac{\mu - 1}{\mu + 1} \right)^2 \frac{1}{2a} 10^{-5} [\text{g/cm}] \quad (9)$$

und die vertikale Komponente der Kraft zwischen dem wirklichen und dem Strom 1

$$f_{01} = f_{03} = 2,04 i^2 \frac{\mu - 1}{\mu + 1} \frac{1}{2 a \sin \alpha/2} \sin \frac{\alpha}{2} 10^{-5} \text{ [g/cm]}. \quad (10)$$

Zusammengefaßt ergibt sich die resultierende Kraft, die den Lichtbogen zur Platte mit dem Einschnitt $\alpha = 90^\circ$ zieht in

$$F = 1,02 \frac{i^2}{a} l \sigma \gamma \left[2 \left(\frac{\mu - 1}{\mu + 1} \right) + \left(\frac{\mu - 1}{\mu + 1} \right)^2 \right] 10^{-5} \text{ [g]}. \quad (11)$$

Für die Bleche mit dem Einschnitt $\alpha = 60^\circ$ ergeben sich nach dreimaliger Spiegelung 5 Spiegelbilder (Abb. 4) mit dem Wert

$$i_{i1} = i_{i5} = i \frac{\mu - 1}{\mu + 1} \quad (12A)$$

$$i_{i2} = i_{i4} = i \left(\frac{\mu - 1}{\mu + 1} \right)^2 \quad (12B)$$

$$i_{i3} = i \left(\frac{\mu - 1}{\mu + 1} \right)^3. \quad (13)$$

Die Bleche mit dem Einschnitt $\alpha = 60^\circ$ ziehen somit den Lichtbogen mit der Kraft

$$F = 1,02 \frac{i^2}{a} l \sigma \gamma \left[2 \left(\frac{\mu - 1}{\mu + 1} \right) + 2 \left(\frac{\mu - 1}{\mu + 1} \right)^2 + \left(\frac{\mu - 1}{\mu + 1} \right)^3 \right] \quad (14)$$

an. Wenn keine Sättigung vorhanden ist, ist also $\mu \gg 1$, ergeben sich bei verschiedenen Plattenformen und gleich großer Entfernung a folgende wirkende Kräfte:

m	α	Wert der relativen Kraft
1	180°	1
2	90°	3
3	60°	5

Im Vergleich zu den rechteckigen Platten wachsen mithin die Kräfte — wenn keine Sättigung vorhanden ist — bei steigendem m auf das $(2m-1)$ fache. Daher wird man den Einschnittswinkel, soweit das die Konstruktionsmöglichkeiten zulassen, zweckmäßig klein wählen.

Es ist interessant, daß der Einfluß der Blechform bei voller Sättigung, wenn also der Koeffizient $\frac{\mu - 1}{\mu + 1}$ wesentlich unter die Einheit sinkt, bedeutend abnimmt. Die sorgfältige Wahl der Blechform ist bei Strömen von weniger als ca. 1000 A besonders bei Motorschaltern von großer Bedeutung.

Die Genauigkeit obiger Berechnung ist aber aus mehreren Gründen beschränkt.

1. Der in den Berechnungen mit 1,5 angenommene Streufaktor ändert sich offenbar mit der Entfernung.

2. In der Praxis — besonders bei Motorschaltern — werden verhältnismäßig kurze Deionlöschkammern verwendet, die aus 4—5 Platten bestehen. Die Berücksichtigung der Enden würde die Berechnung äußerst erschweren.

3. Auch der Radius des Lichtbogens ist nicht ohne Einfluß auf die Kraft, da die Kraftwirkung nach durchgeführter Spiegelung wegen der verhältnismäßig kurzen Entfernungen zwischen Zylindern mit großen Halbmessern berechnet werden muß. Der Radius des Lichtbogens kann nämlich nach Literaturangaben Werte bis zu 0,3—0,6 cm annehmen.

4. Aus konstruktiven Gründen gelingt es nicht immer, ein ganzzahliges m zu erzielen. Die Spiegelungsmethode versagt auch in diesem Fall.

5. Die Anwendung der Spiegelung wird bei komplizierten Deionlöschblechen problematisch und beansprucht eine sehr große Rechenarbeit.

6. Obwohl der Einfluß der Sättigung berechenbar ist, beeinflußt die Sättigung die magnetische Streuung und kompliziert die Verhältnisse noch weiter.

Aus diesen Gründen waren wir bestrebt, eine Meßmethode auszuarbeiten, die die Messung der Kräfte ermöglicht.

Zunächst geben wir die Beschreibung der Meßeinrichtung.

Die Beschreibung der Meßeinrichtung

Aus der soeben dargelegten Berechnung der Kraftwirkungen war zu ersehen, daß die Anziehungskräfte im Meßbereich von 50—400 A einen Wert von ungefähr 0,15—15 g haben werden. Aus diesem Grunde haben wir die Meßeinrichtung aus einer analytischen Waage ausgestaltet. Die Deionlöschbleche wurden an den einen Balken der Waage befestigt und mit der Waagschale austariert. Den elektrischen Lichtbogen verkörperte ein an die Bodenplatte der Waage befestigter Kupferleiter, der sich aus der Anschlußklemme leicht entfernen ließ, so daß die Möglichkeit bestand, Leiter verschiedenen Durchmessers zu messen.

Der Abstand a vom Leiter konnte durch Halbzylinder aus Plexiglas eingestellt werden. Nach Einschaltung des aus einem Akkumulator gespeisten Stromes legte sich das Plattenpaket unter dem Einfluß der Kraft an die Halbzylinder an. Nachher wurde auf einen am Boden der Waagschale montierten Arm, durch einen mit einem Exzenter bewegten »Correx« Dynamometer eine Kraft ausgeübt und zwar so lange, bis sich die Bleche in Bewegung setzten. Die auf diese Weise bestimmten Kräfte wurden in die Diagramme aufgetragen.

Die Kräfte wurden im Strombereich von 50—400 A gemessen, u. zw. fünfmal an je einem Meßpunkt. Das Plattenpaket war am Waagebalken beweglich montiert, was die Einstellung des Abstandes ermöglichte.

Da bei Niederspannungsschaltgeräten bei doppelter Unterbrechung die Löschkammern mit 4 Deionlöschblechen häufig sind, wurden die Untersuchun-

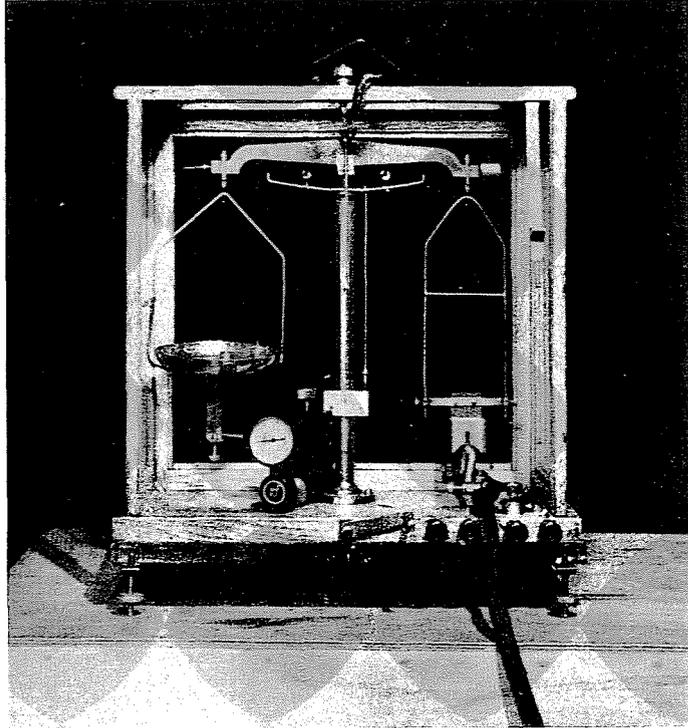


Abb. 5. Lichtbild der Meßeinrichtung

gen an einem aus 4 Platten bestehenden Paket durchgeführt. Die Stärke der Eisenbleche betrug 2 mm, ihr gegenseitiger Abstand voneinander gleichfalls 2 mm.

Meßergebnisse

Der vom Schnittpunkt der beiden Seiten des Blecheinschnittes gemessene Abstand und die in Abhängigkeit von der Stromstärke gemessenen Werte zeigen die Abbildungen 6, 7 und 8. Der Leiterdurchmesser betrug bei den Untersuchungen $d = 0,6$ cm. Der nächste Punkt ergab sich also dann, wenn die Deionplatten am Leiter auflagen. Dieser Abstand betrug bei rechteckigen Platten $a = 0,3$ cm, während bei $a = 90^\circ$, $a = 0,42$ cm, bei $a = 60^\circ$ hingegen

$a = 0,6$ cm war. Bei kleineren Abständen wurde auf die Abstände von 0,2, 0,3 bzw. 0,4 cm extrapoliert. Diese Meßergebnisse wurden zwecks Vergleich mit der Berechnung für den Fall $i = 300$ A in Abhängigkeit vom Abstand

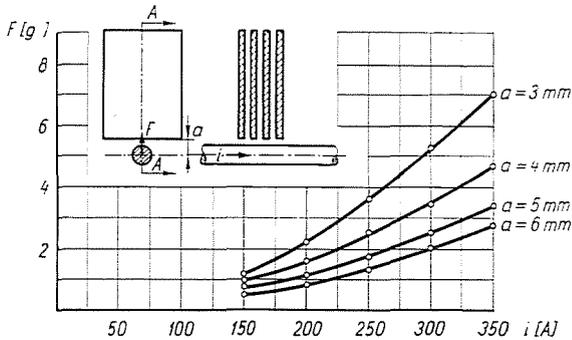


Abb. 6. Gemessene Kraftwerte in Abhängigkeit von Abstand und Stromstärke, bei 4 Platten, $\alpha = 180^\circ$

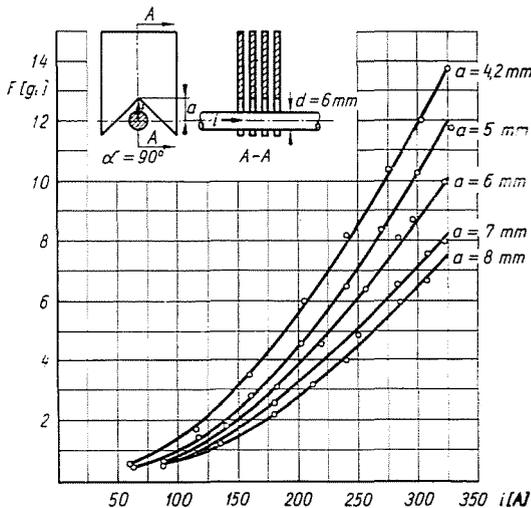


Abb. 7. Gemessene Kraftwerte in Abhängigkeit von Abstand und Stromstärke, bei 4 Platten, $\alpha = 90^\circ$

dargestellt. Die Kurven der Meßergebnisse liegen immer höher als die rechnerisch ermittelten Werte. In den Abbildungen 9, 10 und 11 sind die gemessenen Kurven mit der Ziffer 1, die berechneten Kurven mit der Ziffer 2 bezeichnet.

Es ergibt sich die Frage, was diese Abweichungen verursacht. Im vorangegangenen Punkt wurden die störenden Faktoren behandelt. Unter diesen wollen wir in erster Linie den Einfluß des Leiterhalbmessers und die Enden der Löschkammerlänge betrachten.

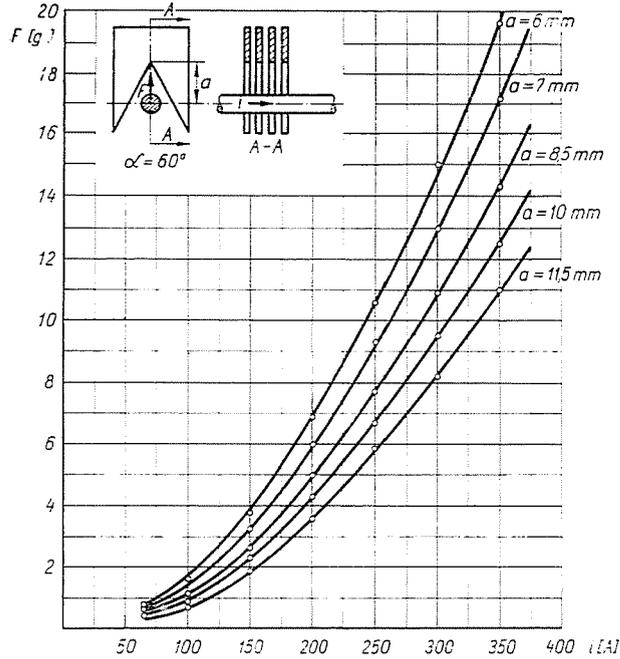


Abb. 8. Gemessene Kraftwerte in Abhängigkeit von Abstand und Stromstärke, bei 4 Platten, $\alpha = 60^\circ$

Der Radius des Leiters hat im Vergleich zum linienhaften Leiter zweifellos eine vergrößernde Wirkung auf die Kraft. Die Achse des Leiters verschiebt sich nämlich aus dem geometrischen Mittelpunkt nach dem anderen Leiter hin, so daß die maßgebende Entfernung kleiner wird (Abb. 12).

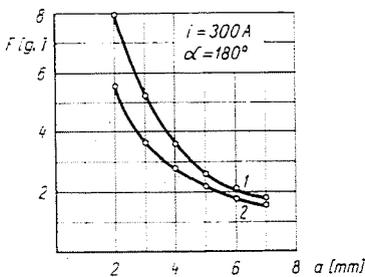


Abb. 9. Gemessene (1) und berechnete (2) Kraftwirkungen bei $i = 300$ A, in Abhängigkeit vom Abstand, $\alpha = 180^\circ$

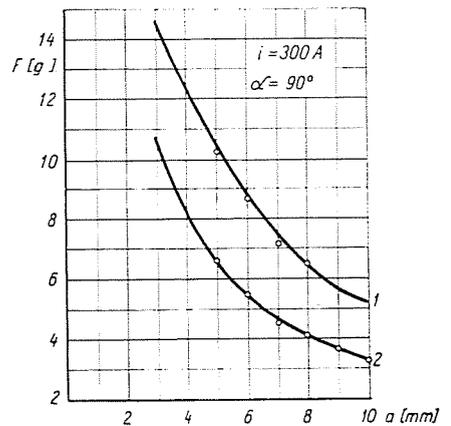


Abb. 10. Gemessene (1) und gerechnete (2) Kraftwirkungen bei $i = 300$ A, in Abhängigkeit vom Abstand, $\alpha = 90^\circ$

Der Wert dieser Verschiebung errechnet sich zu

$$t = a - \sqrt{a^2 - r^2}. \tag{15}$$

Wie aus der Beziehung (14) hervorgeht, wächst die Kraftwirkung als Folge der Radiusvergrößerung folgendermaßen. Der Abstand $2a$ des Spiegelbildes

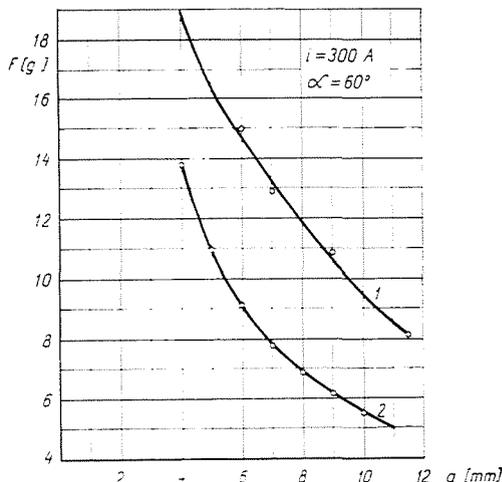


Abb. 11. Gemessene (1) und gerechnete (2) Kraftwirkungen bei $i = 300$ A, in Abhängigkeit vom Abstand, $\alpha = 60^\circ$

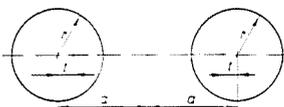


Abb. 12. Verschiebung der Achsen bei Zylindern mit großen Halbmessern

vom wirklichen Strom wird $(2a - 2t)$ betragen. Aus obigen Erwägungen würde sich die Kraftwirkung mit Berücksichtigung des Leiterradius zu

$$F_r = \frac{a}{a - t} F \tag{16}$$

ergeben. Wählt man einen Abstand von $a = 0,3$ cm, hat man in Abhängigkeit vom Radius folgende Werte:

Gemessene Kraft (g)		
r (cm)	$\frac{a}{a - t}$	($i = 212$ A, 4 St. rechteckige Platten)
0,20	1,33	2,6
0,15	1,55	2,5
0,10	1,06	2,3

Der Fall, in dem die Bleche den Leiter berühren, läßt sich mit dieser Methode nicht erfassen. Es zeigt sich, daß die Kraft mit abnehmendem Radius kleiner wird, jedoch in geringerem Maße, als es die Berechnung ergibt. Jedenfalls kann festgestellt werden, daß die Abweichung vom linienhaften Strom bei kleinem Abstand und verhältnismäßig großem Radius eine ungefähr 15%ige Erhöhung der Kraftwirkung ergeben kann.

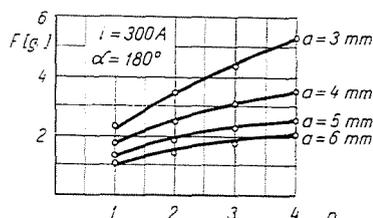


Abb. 13. Gemessene Kraftwerte in Abhängigkeit von der Blechzahl bei $i = 300\text{ A}$ und verschiedenen Abständen $a = 180^\circ$

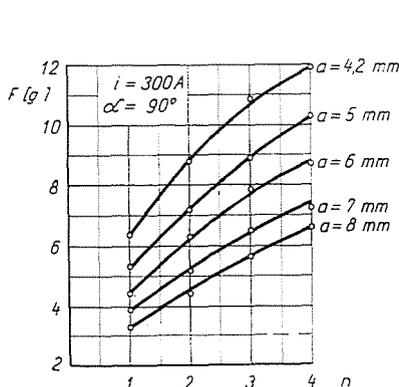


Abb. 14. Gemessene Kraftwerte in Abhängigkeit von der Blechzahl bei $i = 300\text{ A}$ und verschiedenen Abständen $a = 90^\circ$

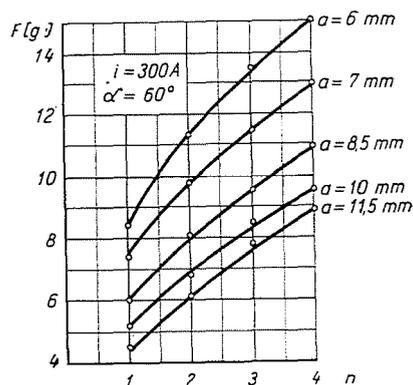


Abb. 15. Gemessene Kraftwerte in Abhängigkeit von der Blechzahl bei $i = 300\text{ A}$ und verschiedenen Abständen $a = 60^\circ$

Die Wahl der Deionlöschbleche übt auf die Kraftwirkung einen großen Einfluß aus; er ist größer als nach den Beziehungen (5), (11) und (14) anzunehmen wäre. Zur Klarstellung des Einflusses der Enden wurden die Kraftwirkungen in Abhängigkeit von der Blechzahl bestimmt. Die Abbildungen 13, 14 und 15 lassen den großen Einfluß der Enden klar erkennen.

Aus Abb. 14 z.B. geht hervor, daß der Wert der Kraft bei einem Abstand von $a = 5\text{ mm}$ und einem Strom von $i = 300\text{ A}$ bei einer Platte 5,3 g, bei 4 Platten 10,2 g beträgt. Diese Messungen zeigen, daß die Kraft nicht annähernd linear mit der Blechzahl ansteigt, wie man aus den Beziehungen (5), (11) und (14) schließen könnte, sondern ungefähr mit der Quadratwurzel, so daß

also das Zweifache der auf ein Blech wirkenden Kraft gleich der auf vier Bleche wirkenden Kraft ist. Für den Bereich bis zu 5 Platten läßt sich mithin festhalten, daß sich die auf n Bleche wirkende Kraft aus der auf ein Blech wirkenden Kraft nach der Formel

$$F \simeq F_1 \sqrt{n} \tag{17}$$

errechnen läßt. Zur Klärung der Verhältnisse wurde für einige Abstände und Plattenformen die hier folgende Tabelle zusammengestellt, die in Abhängigkeit von der Plattenzahl den Koeffizienten für die gemessenen und gerechneten Kraftwerte, den Wert

$$b = \frac{F_m}{F_{sz}} \tag{18}$$

angibt.

a (cm)	$\alpha = 180^\circ$ Plattenzahl n				
	1	2	3	4	5
0,3	2,40	1,86	1,49	1,45	1,31
0,4	2,60	1,90	1,37	1,34	—
0,5	2,36	1,74	1,28	1,18	—
0,6	2,14	1,64	1,27	1,15	—

a (cm)	$\alpha = 90^\circ$ Plattenzahl n				
	1	2	3	4	5
0,5	3,20	2,17	1,65	1,59	1,47
0,6	3,26	2,29	1,71	1,60	1,47
0,7	3,30	2,40	1,68	1,59	1,43
0,8	3,20	2,40	1,65	1,56	1,48

a (cm)	$\alpha = 60^\circ$ Plattenzahl n				
	1	2	3	4	5
0,60	3,66	2,46	1,80	1,60	1,48
0,70	3,80	2,50	1,77	1,70	1,47
0,85	3,70	2,46	1,77	1,73	1,54
1,00	3,77	2,51	1,85	1,72	1,61

Die Werte für 5 Platten wurden aus den Messungen für 4 Platten extrapoliert.

Schlußfolgerungen

Aus den bisherigen Ausführungen und auf Grund der Messungen lassen sich folgende hauptsächliche Schlußfolgerungen ziehen:

1. Die geschilderte Meßeinrichtung ist für die Untersuchung der an Deionlöschblechen komplizierter Form auftretenden Kraftwirkung geeignet. Sie ermöglicht es, Gestalt des Lichtbogens aus Metalleitern auszubilden und so die rechnerisch nicht ermittelbaren Kräfte durch Messung zu ermitteln.

2. Gegenüber den für die Berechnung langer Deionlöschkammern geeigneten Beziehungen ergeben sich in Kammern mit 4 Platten um 60—70% größere Kräfte.

3. Den einen Grund für die Krafterhöhung bildet die Tatsache, daß der Radius des Leiters im Verhältnis zum Abstand nicht vernachlässigt werden kann. Nach den Messungen verursachte die Änderung des Radius von 0,7 bis 0,3 cm bei einem gegebenen Abstand einen 15%igen Kraftanstieg.

4. Der Unterschied zwischen rechnerisch ermittelten und gemessenen Kräften sinkt mit steigender Plattenzahl, doch sank sein Wert innerhalb der Grenzen der Untersuchung — zwischen einer und fünf Platten — in Abhängigkeit von der Plattenform. Bei der rechteckigen Platte sank er von 2,4 auf 1,3, bei eingeschnittenen Platten mit $\alpha = 90^\circ$ von 3,2 auf 1,45, mit $\alpha = 60^\circ$ von 3,7 auf 1,5.

5. Im Bereich von 4—500 A braucht mit der Sättigung nicht gerechnet zu werden; die Kraftwirkungen sind dem Quadrat der Stromstärke proportional.

6. Da die Deionlöschbleche auf den Lichtbogen eine beträchtliche Kraftwirkung ausüben, können Eisenbleche in bestimmten Konstruktionen nicht nur zur Zergliederung, sondern zur Bewegung des Lichtbogens angewendet werden. Gegenüber den Blasspulen haben die lichtbogenziehenden Eisenplatten den Nachteil, auf den Lichtbogen anfangs eine kleinere und dann, mit der Verkürzung des Abstandes, eine wachsende Kraft auszuüben. Dagegen haben sie den Vorzug der Einfachheit und Billigkeit.

7. Wie schon aus dem bisher Gesagten ersichtlich, führt die Verminderung des Winkels α zur Erhöhung der Kraft, und zwar bei einem $\alpha = \frac{\pi}{m}$ auf das $(2m-1)$ fache. Eine Tangente mit dem gegebenen Radius r kann aber vom Bezugspunkt im minimalen Abstand von

$$a_{\min} = \frac{r}{\sin \frac{\alpha}{2}} \quad (19)$$

bzw. in einem mit abnehmendem Winkel α wachsenden Abstand angelegt werden. Für quadratische Platten ergibt sich die Kraftwirkung aus der Beziehung (5). Faßt man die einzelnen Konstanten zusammen und setzt man sie in die Beziehung (18) ein, wird die Kraftwirkung eines mit dem Winkel $\alpha = \frac{\pi}{m}$ ausgeschnittenen Bleches

$$F = ki^2(2m-1) \sin \frac{\pi}{2m} . \quad (20)$$

Die hier folgende Tabelle enthält die Vergleichswerte. (Es handelt sich um relative Werte.)

m	2 m-1	α	$\sin \frac{\pi}{2 m}$	a_{\min}	Relative Kraft F_r
1	1	180	1,000	1 r	1,00
2	3	90	0,707	1,41 r	2,13
3	5	60	0,500	2 r	2,50
4	7	45	0,384	2,6 r	2,69
6	11	30	0,260	3,85 r	2,86
8	15	22,5	0,198	6,41 r	2,96

Auch diese Tabelle zeigt, daß die kraftherhöhende Wirkung des Einschnittes wegen des Anwachsens des Abstandes nur in beschränktem Maße auftritt. Außerdem muß die Vergrößerung der Abmessungen als Preis für die größere Anziehungskraft in Kauf genommen werden. Jedenfalls geht aus der Tabelle hervor, daß sich bei gleichbleibendem Abstand neben den Kontakten und bei Einschnittswinkeln zwischen 90° und 60° auf Grund der Beziehung (20) ein 17%iger Kraftanstieg ergibt, ohne daß sich die Abmessungen erheblich vergrößern müßten. Aus diesen Gründen ergibt sich für 60° ein 1,4mal größerer Abstand. Die Angaben beziehen sich auf 300 A und 4 Platten.

$\alpha = 90^\circ$	$a = 0,707$ cm	$F_{90} = 7,3$ g	$\frac{F_{60}}{F_{90}} = 1,23$
$\alpha = 60^\circ$	$a = 1,000$ cm	$F_{60} = 9,5$ g	
$\alpha = 90^\circ$	$a = 0,420$ cm	$F_{90} = 12,0$ g	$\frac{F_{60}}{F_{90}} = 1,23$
$\alpha = 60^\circ$	$a = 0,595$ cm	$F_{60} = 14,9$ g	
$\alpha = 90^\circ$	$a = 0,814$ cm	$F_{90} = 7,3$ g	$\frac{F_{60}}{F_{90}} = 1,12$
$\alpha = 60^\circ$	$a = 1,150$ cm	$F_{60} = 8,2$ g	

Die Messungen ergeben mit ausreichender Genauigkeit den rechnerisch ermittelten Kraftanstieg. Die Abweichung ist kleiner als 5%.

Wie ersichtlich, ergab sich bei zwei Abständen ein Anstieg von 23%, bei einem Abstand ein solcher von 12%.

Der Lichtbogen bewegt sich nicht ständig genau in der Plattenachse, es wirkt somit auf ihn auch eine Kraft in seitlicher Richtung; sobald er dann die Deionlöschbleche erreicht, ist er bestrebt, sich an deren Achse zu halten. Bei dem an den Blechen sich fortbewegenden Lichtbogen ergeben sich weitere Probleme.

Beim Anlauf treten jedoch die in diesem Aufsatz behandelten Verhältnisse auf, und die auf den Lichtbogen wirkende Kraft ist von großer Wichtigkeit, da sie die Bewegung des Lichtbogens und somit den Abbrand beeinflusst.

Zwecks Vergleich mit der durch die Deionlöschbleche aufgewendeten Kraft lohnt es sich zu untersuchen, welche Kräfte auf den Lichtbogen infolge

der Verschleifung des Stromweges wirken. Nach Biermanns ist

$$F = 0,8 i^2 \left(2 \ln \frac{d}{r} + 0,5 \right) 10^{-8} \text{ [kg] } , \quad (21)$$

wenn d den gegenseitigen Abstand der Stromleiter und r den Radius des Leiters bezeichnet.

Ähnlich wie bei den Messungen ergibt sich bei $r = 0,3$ cm, $d = 1,5$ cm, $i = 300$ A ein $F = 2,6$ g. Diese Kraft macht 15—25% der von den Deionlöschblechen ausgeübten Kraft aus, weshalb auf die Ausgestaltung des Stromweges Bedacht genommen werden muß. Im Falle der Sättigung wächst die von den Blechen ausgeübte Kraft langsamer, die von der Schleifenwirkung herrührende Kraft hingegen mit dem Quadrat der Stromstärke, so daß deren Rolle bei stärkeren Strömen von größerer Bedeutung ist.

Zusammenfassung

Der Verfasser behandelt zuerst die gebräuchlichen Berechnungsmethoden zur Bestimmung der zwischen dem Lichtbogen und den Platten auftretenden Kraftwirkung. Sodann untersucht er, warum diese bei den gebräuchlichen, aus 4—5 Deionlöschblechen bestehenden Löschkammern kein genaues Resultat ergibt. Nach Untersuchung von Deionlöschblechen verschiedener Form, beschreibt er die Meßeinrichtung, in der den Lichtbogen ein massiver Metallleiter ersetzt und die Kraft mit einer Waage gemessen wird. Er zeigt die Kraft in Abhängigkeit vom Abstand und Stromstärke, ferner die in Abhängigkeit von der Zahl der Deionplatten gemessenen Werte. Nach Vergleich der Berechnungs- und der Meßresultate, stellt sich heraus, daß die gemessenen Werte größer sind als die berechneten. Der Abschluß des Aufsatzes untersucht den Grund der Abweichungen, um schließlich zu Schlußfolgerungen zu gelangen.

Literatur

1. KÜPFMÜLLER, K.: Einführung in die theoretische Elektrotechnik, Springer Verlag, Berlin 1962.
2. BRON, O. B.: Elektritscheskaja duga w apparatach uprawlenjije, Energoisdat, Moskau—Leningrad 1954.
3. BURKNARD, G.: Ein Beitrag zur Lichtbogenwanderung auf ferromagnetischen Flächenelektroden, *Elektrie*, **15**, 363 (1961).
4. BURKNARD, 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).

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