

EINFLUSS DER MAGNETISCHEN BLASUNG AUF DIE BOGENLÖSCHZEIT IN WECHSELSTROMSCHÜTZEN

Von

S. DOMONKOS

Lehrstuhl für Hochspannungstechnik und Geräte, Technische Universität, Budapest

(Eingegangen am 12. Oktober 1961)

Vorgelegt von Prof. DR. J. EISLER

1. Einleitung

Die magnetische Bogenblasung spielt bei einer großen Gruppe von Niederspannungs-Schaltgeräten eine wichtige Rolle. Sie hat eine doppelte Aufgabe.

1. Sie zwingt den elektrischen Bogen in die Löschkammer, die entweder mit Deion-Plättchen versehen oder als enge Scharte ausgebildet ist. Hier helfen wirksame Löschfaktoren den Bogen zu löschen. Mit diesen Löschsystemen können bei kurzen Bogenlängen hohe Bogenspannungen, bzw. hohe rückkehrende elektrische Festigkeiten erzielt werden.

2. Spielt die Bogenblasung bei einer bedeutenden Gruppe von Schaltgeräten die Rolle eines selbständigen Löschfaktors. Die Kontakte sind derart ausgestaltet, daß die Länge des unter dem Einfluß des magnetischen Feldes sich versetzenden Lichtbogens schnell anwächst. Hiedurch ergibt sich, bei gleichbleibenden Lichtbogengradienten eine schnell anwachsende Lichtbogen-spannung. Die vorliegende Abhandlung will sich mit einer eingehenderen Untersuchung der sogenannten »Löschung mit langen Lichtbogen« befassen, u. zw. auf Grund einer Meßserie, die an einem magnetischen Schütz ausgeführt wurde.¹

2. Theoretische Grundlagen

Der lange Lichtbogen spielt in einem Stromkreis eine ähnliche Rolle wie ein schnell anwachsender Ohmscher Widerstand: Durch Erhöhung der Impedanz des Stromkreises setzt er die Stromstärke herab und verbessert gleichzeitig den Leistungsfaktor. Hiedurch vermindert sich einerseits die

¹ Die Messungen wurden in den Elektrischen Maschinen- und Kabel-Werken vorgenommen, wobei Herr. Dipl.-Ing. F. NOVOTNY wertvolle Hilfe geleistet hat, für die ihm Dank gebührt.

Ionisierung im Raum zwischen den Kontakten, andererseits die Einschwingspannung als Folge Verbesserung des Leistungsfaktors. In Abb. 1 ist der Verlauf der Ausschaltleistungswerte eines Schalters in Abhängigkeit vom Leistungsfaktor bei verschiedenen Spannungen aufgetragen.

Auf Grund dieser Abbildung läßt sich die Arbeitsweise des Schalters erklären. Es soll z. B. ein Strom unterbrochen werden, der die Ausschaltlei-

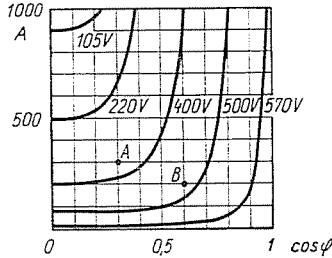


Abb. 1. Ausschaltleistungen eines Schalters in Abhängigkeit vom Leistungsfaktor bei verschiedenen Spannungen (1)

stung des Schalters im Punkt A übersteigt. Unter dem Einfluß der wachsenden Lichtbogen-Spannung gelangt der Schalter allmählich zu einem Punkt B, bei welchem die Lichtbogen-Löschfähigkeit des Schalters den Einfluß der den Lichtbogen aufrecht erhaltenden Faktoren übersteigt.

Die Abhandlung setzt sich das Ziel, die Form des Unterbrechungsstromes zu bestimmen. Hierzu muß zunächst die Lichtbogen-Spannung untersucht wer-

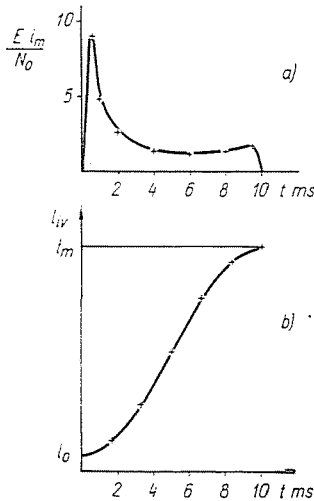


Abb. 2. a) Auf die Längeneinheit bezogene Lichtbogen-Spannung bei $\omega \tau = 0,125$ (5)
 b) Das angenommene Wachstum der Lichtbogenlänge während einer Halbwelle, wenn die Ausdehnungsgeschwindigkeit einen sinusförmigen Verlauf zeigt

den. Unter weitgehender Vereinfachung der Erscheinungen soll als Grundlage die durch O. MAYR berechnete Lichtbogenspannung bei aufgezwungenem Strom gewählt werden, die die Form $i = i_m \sin \omega t$ hat.

Die auf die Längeneinheit bezogene Lichtbogenspannung beträgt

$$E = \frac{2 N_0 \sin \omega t}{i_m \left[1 = \frac{\sin 2 \omega t + \varphi}{\sqrt{1 + (2\omega\tau)^2}} \right]} \quad [\text{V/cm}], \quad (1)$$

worin

N_0 die abgegebene Leistung je Längeneinheit [W/cm] und
 τ die Zeitkonstante des Lichtbogens ist.

Der aus den Oszillogrammen ersichtlichen Lichtbogenspannungsform steht $\omega\tau = 0,125$ am nächsten. Dies ergibt die Form des stehenden Lichtbogens, die in relativen Einheiten in Abb. 2a aufgetragen ist.

Es soll nun der Zusammenhang zwischen Ausdehnungsgeschwindigkeit des Lichtbogens und Stromstärke untersucht werden.

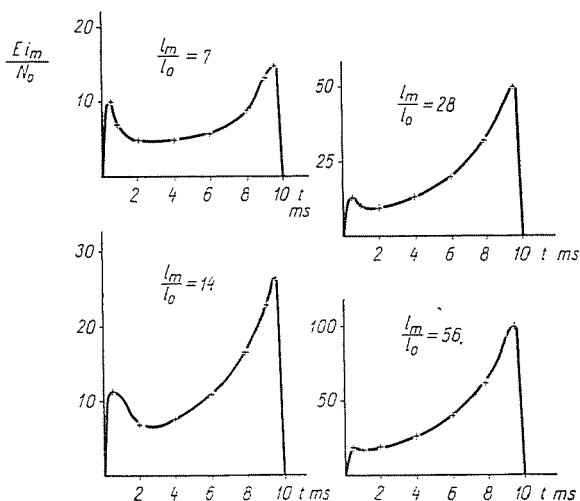


Abb. 3. Form der Lichtbogenspannung, falls die Bogenlänge während einer Halbwelle auf das $\frac{l_{\max}}{l_0}$ -fache ihrer Anfangslänge wächst, entsprechend der Abb. 2b

a) $\frac{l_{\max}}{l_0} = 7$

c) $\frac{l_{\max}}{l_0} = 28$

b) $\frac{l_{\max}}{l_0} = 14$

d) $\frac{l_{\max}}{l_0} = 56$

Vor allem ist es erforderlich, die Form der Lichtbogen­spannung für den Fall zu untersuchen, daß sich die Länge des Lichtbogens während einer Halbwelle wesentlich ändert. Das Anwachsen der Lichtbogenlänge in der Zeiteinheit, das heißt die Ausdehnungsgeschwindigkeit des Lichtbogens, wird durch die Stromstärke bestimmt. Es kann daher angenommen werden, daß die Ausdehnungsgeschwindigkeit einen sinusförmigen Verlauf nimmt. Der Ein-

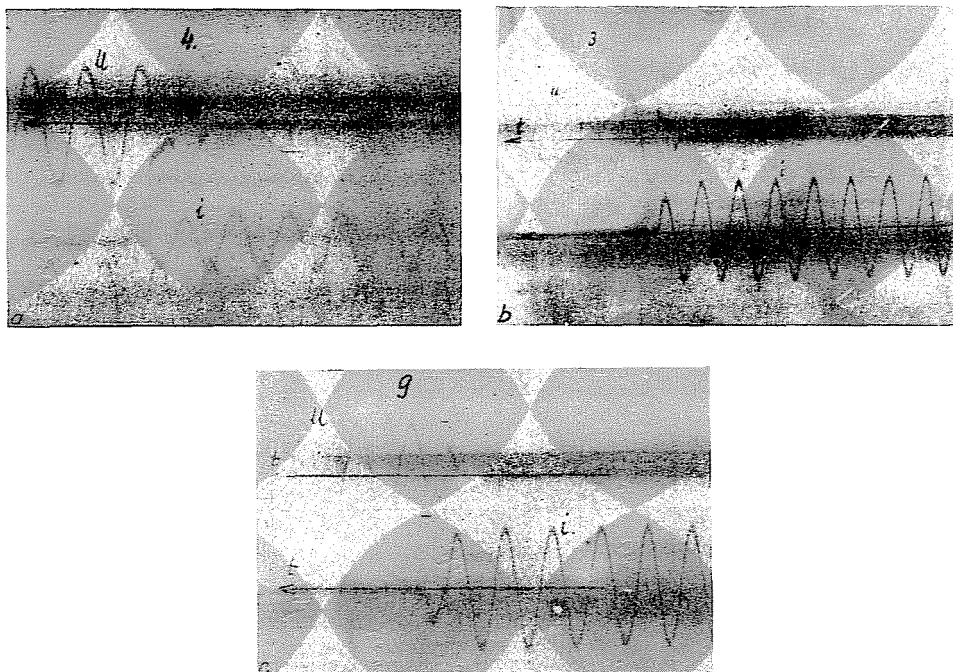


Abb. 4. Lichtbogen­spannungsformen nach Oszillogrammen

a)	$N = 1\frac{3}{4}$	$I = 129 \text{ A}$
b)	$N = 3\frac{3}{4}$	$I = 80 \text{ A}$
c)	$N = 4\frac{3}{4}$	$I = 120 \text{ A}$

fluß der Quergeschwindigkeit auf die Lichtbogen­spannung kann vernachlässigt werden. Abb. 2b zeigt die Lichtbogen­längen während einer Halbwelle für den Fall, daß sich die Ausdehnungsgeschwindigkeit dem Sinus­Gesetz gemäß ändern, wobei l_{\max} die am Ende der Halbwelle erreichte Länge des Lichtbogens bedeutet.

In den untersuchten 4 Fällen wuchs der Lichtbogen auf das 7-, 14-, 28- und 56fache der Einheitslänge l_0 am Anfang der Halbwelle an. Die in diesen Fällen sich ergebenden Lichtbogen­spannungen sind aus den Abbildungen 3a...d ersichtlich, wogegen die Abb. 4 die Spannungsformen gemäß den Oszillogrammen veranschaulicht.

Die Werte der Bogenspannungskurve ergab sich durch Multiplikation des im Zeitpunkt t_1 der Einheits-Bogenlänge zugehörigen Spannungsmomentanwertes E_1 und der Bogenlänge l_1 , d. h. aus

$$U_1 = E_1 l_1. \quad (2)$$

Trotz der bedeutenden Vernachlässigungen zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Formen der gemessenen und der berechneten Lichtbogenspannungskurven. Der Kurvenverlauf läßt erkennen, daß sich die Kurve um so mehr der Geraden nähert, je schneller die Lichtbogenspannung wächst. Die Oszillogramme der Abb. 4 zeigen solche dem geradlinigen Verlauf nahekommende Lichtspannungsformen.

Es soll nun der Verlauf der Stromkurve bei linearem Anwachsen der Lichtbogenspannung berechnet werden.

Der Einfachheit halber wird der Ohmsche Widerstand des Stromkreises vernachlässigt, womit ermöglicht wird, den Einfluß der wachsenden Lichtbogenspannung in einem reinen induktiven Stromkreis zu untersuchen. Offenbar kann ein lineares Anwachsen der Lichtbogenspannung angenommen werden, so daß sich die Spannungsgleichung zu

$$U_H = L \frac{di}{dt} + mt \quad (3)$$

schreibt, wenn

U_H die Netzspannung,

m die Steilheit der Lichtbogenspannung,

t die Zeit, gerechnet vom Anfang der Ausschaltung bedeutet.

Mit einer Netzspannung $U_H = U_{Hm} \cos \omega t$ und nach Trennung der Variablen und nach Integration erhält man für die Stromstärke während der ersten Halbwelle

$$i_m = \frac{U_{Hm}}{\omega L} \sin \omega t - \frac{mt^2}{2L}, \quad (4)$$

worin

$\frac{U_{Hm}}{\omega L} = i_F$ den Maximalwert des unabhängigen Kurzschlußstromes (prospective short-circuit current, laut IEC Publ. 56—1),

i_m hingegen den Wert des Abschaltstromes darstellt, der durch die Lichtbogenspannung verzerrt wurde.

Die Änderung der Stromstärke während der ersten Halbwelle wird in der Literatur eingehend behandelt, für die vorliegende Abhandlung sind jedoch auch die weiteren Halbwellen von Interesse, da der Lichtbogen im Untersuchungsgerät erst nach mehreren Halbwellen gelöscht wird.

Nimmt man an, daß der Nulldurchgang des Stromes im Zeitpunkt t_1 erfolgt (Abb. 5), so ist die Lichtbogenspannung zu diesem Zeitpunkt U_1 . Die Spannungsgleichung der zweiten Halbwelle schreibt sich daher zu

$$U_{Hm} \cos \omega t = L \frac{di}{dt} + U_1 + m(t - t_1). \quad (5)$$

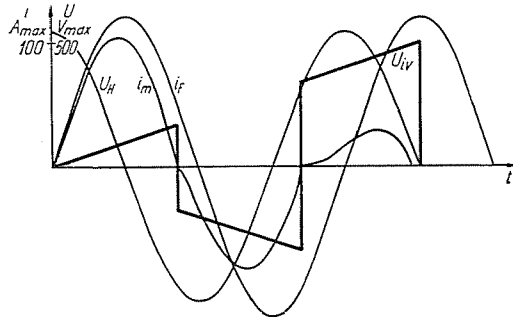


Abb. 5. Der Lichtbogenstrom bei $U = 380$ V, $I = 85$ A_{eff} und bei einer Steilheit der Lichtbogen­spannung von $m = 20$ V/ms. Die Ausschaltung beginnt bei $a = 0^\circ$

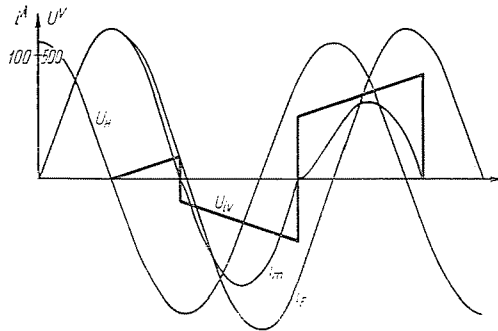


Abb. 6. Der Lichtbogenstrom bei $U = 380$ V, $I = 85$ A_{eff} und bei einer Steilheit der Lichtbogen­spannung von $m = 20$ V/ms. Die Ausschaltung beginnt bei $a = 90^\circ$

(Die Lichtbogen­spannung hat die der Spannung in der ersten Halbwelle entgegengesetzte Polarität). Geordnet und integriert nimmt (5) die Form

$$i_m = \frac{U_{Hm}}{\omega L} \sin \omega t + \frac{m}{2L} (t - t_1)^2 + \frac{U_1}{L} (t - t_1) + K \quad (6)$$

an, worin K eine Integrationskonstante ist. Sie kann aus der Bedingung errechnet werden, daß i_m im Zeitpunkt $t = t_1$ den Wert Null annimmt. Es ergibt sich daher

$$K = - \frac{U_H}{\omega L} \sin \omega t_1. \quad (7)$$

Der Strom setzt sich aus 4 Teilbeträgen zusammen. Die Berechnung für die weiteren Halbwellen bleibt dieselbe.

Es sollen nun die Berechnung und die Konstruktion für $U_H = 380 V_{eff}$, für einen Belastungsstrom von $I_{eff} = 85 A$, für eine Lichtbogenspannungsteilheit von $m = 20 V/ms$ durchgeführt werden, u. zw. unter der Voraussetzung, daß der Kurzschlußstrom beim Nulldurchgang einsetzt. Der Belastungsstrom i_F und der tatsächlich resultierende Unterbrechungsstrom i_m sind in Abb. 5 aufgetragen. Wie man sieht, verkürzt sich der Zeitabstand zwischen den Nulldurchgängen von Spannung und Strom mit abnehmendem Strom. Aus Abb. 1 geht hervor, daß es bei dem von FRANKEN [1] mit 400 V geprüften Schalter ein Leistungsfaktor von etwa 0,6 war, bei dem die Ausschaltleistung plötzlich anstieg. Bei diesem Schütz wurde der Leistungsfaktor von außen her, durch Änderung der Charakteristik des äußeren Belastungskreises verbessert. Der Lichtbogen brennt daher, solange die zu seiner Löschung günstigen Verhältnisse nicht erreicht sind. Selbstverständlich eignet sich das Diagramm Frankens nur zu einem qualitativen Vergleich, da es sich auf ein ganz anderes Gerät bezieht.

Hier haben die Übergangserscheinungen (Transienten) keinen Einfluß auf die Unterbrechung des Stromes im Leistungsschalter. Zu berücksichtigen ist der Zeitpunkt, zu dem der Leistungsschalter zu arbeiten beginnt. Gemäß Abb. 6 setzt die Ausschaltung 90° nach dem Nulldurchgang des Stromes ein. Von da ab wächst auch die Lichtbogenspannung.

Im ersten Fall, bei $a = 0$, erfolgt die Löschung des Lichtbogens voraussichtlich beim zweiten Nulldurchgang des Stromes. Die dritte Halbwellen kommt nur selten zustande. Aus dem Diagramm ergibt sich somit eine Löschzeit von $t = 16,6 ms$.

Bei $a = 90^\circ$ kommen für die Löschung zwei Möglichkeiten in Frage: Sie kommt entweder im Zeitpunkt $t_2 = 12,4 ms$ zustande, wenn der Strom auf seinen 0,683fachen, oder im Zeitpunkt $t_3 = 20,8 ms$, wenn der Strom auf das 0,52fache seines Anfangswert gesunken ist.

Aus analogen Überlegungen kann für $a = 45^\circ$ ein $t = 14,5 ms$ und für $a = 135^\circ$ ein $t = 18,3 ms$ erwartet werden. Bei sonst gleichen Bedingungen kann man also mit einem Verhältnis von 1 : 1,7 zwischen minimaler und maximaler Lichtbogendauer rechnen.

Die Stromform auf den Oszillogrammen zeigt eine gewisse Ähnlichkeit mit der konstruierten Stromkurve.

3. Meßergebnisse

Die Ausschaltversuche wurden als einpolige Unterbrechungen mit einem Schalter gemäß Abb. 7 durchgeführt, u. zw. bei einer Netzspannung von 380 V_{eff} und bei einem Leistungsfaktor von $\cos \varphi = 0,4$. Wie ersichtlich, besitzt

der Schalter je eine Unterbrechungsstelle je Pol. Als Induktivitäten wurden im Stromkreis eisenlose Drosselspulen benützt. Die Ausschaltung erfolgte 0,5...1 s nach erfolgtem Einschalten des Stromes. Zwischen den Ausschaltungen vergingen 8...10 s. Wie aus der Form des Strompfades hervorgeht, bewegt sich der Lichtbogen nach dem Inneren des Gerätes zu, wenn die magnetische Blasung nicht eingeschaltet ist. Die Ausschaltversuche wurden also nach Beendigung der Versuchsserie auch ohne magnetische Blasung ausgeführt.

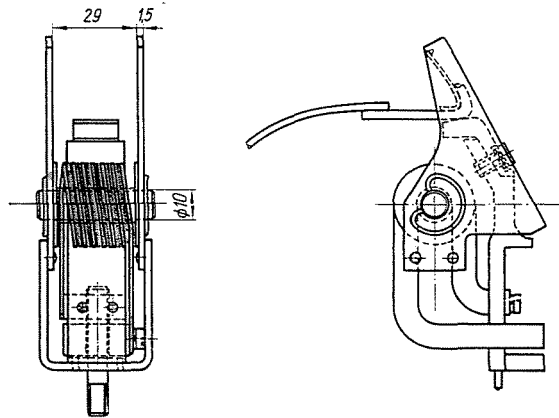


Abb. 7. Skizze des untersuchten Schalters

Die Versuche wurden mit $13\frac{1}{4}$... $83\frac{1}{4}$ Blaswindungen und im allgemeinen mit je sechs Stromwerten zwischen 34 und 350 A durchgeführt. In jedem Meßpunkt wurden 4...6 Oszillogramme aufgenommen.

Die Versuchsserie setzte sich zum Ziel, den Einfluß festzustellen, den die Zahl der Blaswindungen bzw. die blasende Feldstärke auf die Löschdauer des Lichtbogens ausübt. Die Oszillogramme wurden daher vor allem vom Gesichtspunkt der Lichtbogendauer aus ausgewertet, wobei sich folgende Resultate ergaben. (Bei jedem Stromwert ist auch das Verhältnis zwischen minimaler und maximaler Löschdauer angegeben.)

		Zahl der Blaswindungen $N = 0$					
Stromstärke	I [A]	34,5	57	81,8	121	186	354
Dauer der Lichtbogenlöschung	t [ms]	456	40	83,5	58,8	23,5	34,2
		82,4	142	73,4	106	34	26,7
		98	56	104	29,6	38	25,4
		70	63	89	44,5	38	45,4
		75,5	62	98,5	34,8		25,2
t_{\max}		6,5	3,5	1,42	3,58	1,67	1,8
t_{\min}							

Bei kleineren Strömen bleibt der Lichtbogen stehen, woraus sich die lange Bogendauer ergibt. Während der Lichtbogendauer erlischt der Bogen des öfteren und zündet sodann wieder. Auf die Auswertung kommen wir noch zurück.

$N = 1\frac{3}{4}$ Windungen

I [A]	57,5	76	129	196	354
t [ms]	35,7	25,3	23,7	18,3	7,6
	34,5	28,25	37,6	19,2	26,5
	25,3	24,5	17,2	20,0	17,8
	48,8	25,6	26,6	15,0	14,6
	37,9	27,1	27,2	25,5	8,5
	38,4		25,2	26	17,7
				18,2	19,0
$\frac{t_{\max}}{t_{\min}} =$	1,93	1,12	2,18	1,43	3,5

Gegenüber dem ersten Fall ergaben sich insofern zwei qualitative Abweichungen, als sich die Lichtbogendauer verkürzte und die Streuung bei niedrigen Strömen kleiner wurde. Bei der verhältnismäßig kleinen Zahl von Messungen ist es als interessant zu berechnen, daß das konstruktiv ermittelte Verhältnis $\frac{t_{\max}}{t_{\min}} = 1,6 \dots 1,8$ ganz gut in Erscheinung tritt. Ebenso fällt auf, daß die Bogendauerwerte bei der Stromstärke 76 A kaum einige Schwankungen zeigen. Interessant ist ferner die Tatsache, daß bei höheren Stromstärken hier z. B. bei 354 A, große Streuungen auftreten.

$N = 2\frac{3}{4}$ Windungen

I [A]	57,5	76	129	196	354
t [ms]	35,6	25,0	16,9	25,6	27,5
	36,4	27,0	18,3	26,2	7,3
	36,7	18,3	36,8	22	18,2
	29,6	39,0	14	17,6	15,7
	28,2	29,3	21,8	26,2	15,7
	30,0	27,5			
	25,6				
$\frac{t_{\max}}{t_{\min}} =$	1,43	2,13	2,18	1,49	3,35

Die Streuungen sind den bei $1\frac{3}{4}$ Windungen ermittelten Streuungen ähnlich. Eine Gesetzmäßigkeit ist schwer zu erkennen, doch läßt sich eine fallende Tendenz beobachten. Die starke Streuung bei 345 A fällt auch hier auf.

$N = 3\frac{3}{4}$ Windungen

I [A]	34,5	58	80	120	192	345
t [ms]	44,9	40,0	41,4	14,7	17,0	13,7
	44,5	25,9	49,5	25,0	16,2	13,8
	28,0	25,5	32,8	17,2	15,9	15,0
	44,6	27,6	15,9	17,3	12,5	7,0
	38,5		13,7	18,5	15,2	15,0
	48,3		12,0	9,0	18,5	14,1
$\frac{t_{\max}}{t_{\min}} =$	1,73	1,57	4,13	2,78	1,48	1,9

Eine starke Streuung zeigt sich hauptsächlich bei 80 A, wobei interessanterweise die ersten zwei Werte ausgesprochen hoch sind, wogegen die folgenden dem Durchschnitt entsprechen.

$N = 4^{3/4}$ Windungen

I [A]	34,5	58	80	120	192	354
t [ms]	45,2	22	17,9	7,55	16,7	16,3
	46,6	23,8	17,2	18,8	15,5	12,8
	50	26	17,2	18,3	14,3	6,9
	45,6	23	15,8	6,2	8,3	15,3
	45,2	24	17,5	13,3	23,2	7,5
	47,8				6,5	20,7
$\frac{t_{\max}}{t_{\min}} =$	1,11	1,18	1,13	3,03	3,57	3

Die Lichtbogendauer bei höheren Blaswindungszahlen enthält die hier folgende Zusammenstellung zusammengefaßt. Diese Werte wurden seinerzeit durch Herrn Dipl.-Ing. J. KANABÉ ermittelt und uns zuvorkommend zur Verfügung gestellt.

I [A]	49,3	73,5	133	200
$N = 6^{3/4}$ Windungen	17,5	21,2	13,6	10
t [ms]	12,6	20,2	11,5	7
$N = 8^{3/4}$ Windungen	17,6	19,3	6,3	7,9
t [ms]	17,0	15,2	6,8	13,2

Die Werte der Lichtbogendauer sind hier wesentlich kürzer als bei den niedrigeren Blaswindungszahlen.

4. Auswertung der Messungen

Im untersuchten Strombereich von 34...354 A wird die Bogendauer allmählich kürzer. Offenbar gibt es einen Stromwert unter 34 A, von dem ab die Bogendauerwerte kleiner zu werden beginnen. Dies wird der kritische Stromwert des Gerätes sein. Vom kritischen Stromwert aufwärts gilt der Zusammenhang

$$t = A I^{-B} \quad \begin{matrix} i[\text{A}] \\ t[\text{ms}] \end{matrix}$$

Hier taucht die Frage auf, wie die Konstanten der Hyperbel bestimmt werden könnten. Die einfachste Methode bestünde in der Bildung von der Durchschnittswerten, an die die Hyperbel sodann anzupassen wäre.

Nach einer anderen, pünktlicheren Methode müßte die Kurve derart aufgetragen werden, daß die Summe der Quadrate der Abweichungen ein Minimum erreicht. Für die ganze Kurvenschar soll zunächst ein Wert von

$B = 0,5$ angenommen werden. (Die Erklärung hierfür siehe unter VII. Auswertung.) Die Werte der Konstante »A« sind:

N	$1\frac{3}{4}$	$2\frac{3}{4}$	$3\frac{3}{4}$	$4\frac{3}{4}$	$6\frac{3}{4}$	$8\frac{3}{4}$
A	274	260	232	212	134,1	125

Der Fall von $N = 0$ wird gesondert behandelt.

Die Meßpunkte und die Hyperbeln sind in den Abbildungen 8, 9, 10, 11, 12 und 13 aufgetragen, die eine ganz gute Annäherung erkennen lassen. Nur in der Abb. 11 für $N = 4\frac{3}{4}$ zeigt sich eine gewisse Abweichung, doch würden weitere Messungen vermutlich auch diese vermindern. Im Endresultat

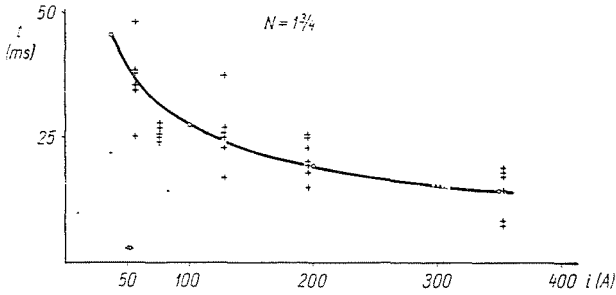


Abb. 8. Lichtbogendauer bei $N = 1\frac{3}{4}$ Blasenwindungen
 $N = 2\frac{3}{4}$

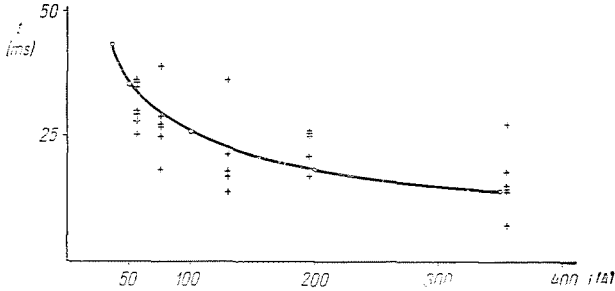


Abb. 9. Lichtbogendauer bei $N = 3\frac{3}{4}$ Blasenwindungen
 $N = 3\frac{3}{4}$

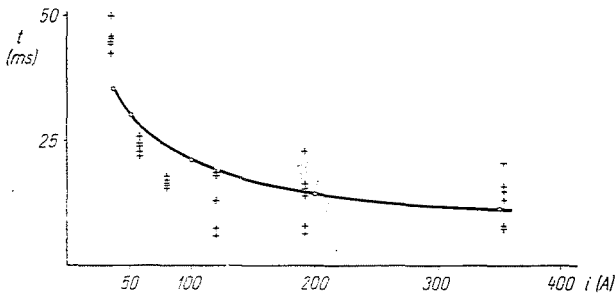


Abb. 10. Lichtbogendauer bei $N = 3\frac{3}{4}$ Blasenwindungen

kann festgestellt werden, daß die gemessenen Punkte in einer Zone von etwa $\pm 50\%$ um die angegebenen Kurven liegen. Die Streuzone wird sehr breit, sofern eine Löschung innerhalb einer Halbwelle zustandekommen kann.

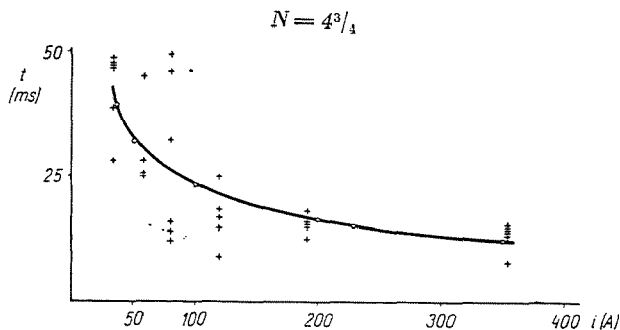


Abb. 11. Lichtbogendauer bei $N = 4\frac{3}{4}$ Blasenwindungen

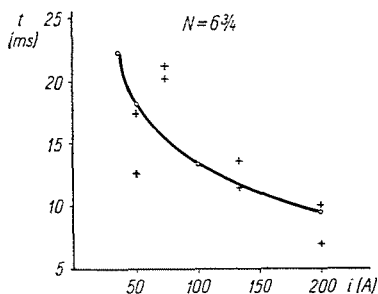


Abb. 12. Lichtbogendauer bei $N = 6\frac{3}{4}$ Blasenwindungen

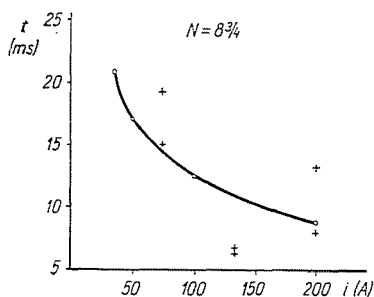


Abb. 13. Lichtbogendauer bei $N = 8\frac{3}{4}$ Blasenwindungen

Deutlich läßt sich der Einfluß der Zahl der Blasenwindungen auf die Löschdauer erkennen, wenn die Hyperbeln der Abbildungen 8...13, die das Mittel der Lichtbogendauerwerte darstellen, in eine einzige Abbildung (Abb. 14) zusammengefaßt werden.

Trägt man die Werte der Konstante A als Funktion der Blasenwindungszahl auf, so liegen vier von insgesamt sechs Punkten auf einer Geraden, wie

dies aus Abb. 15 hervorgeht. Der Punkt der $2\frac{3}{4}$ -Windungen liegt etwas oberhalb der Kurve, jener der $6\frac{3}{4}$ -Windungen hingegen stark unter dieser. Geht man von der Annahme aus, daß ein linearer Zusammenhang zwischen der

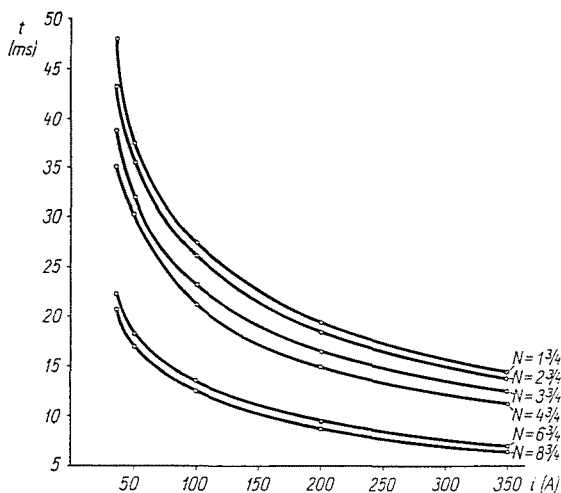


Abb. 14. Die Kurven $t = A \cdot i^{-0.5}$ für verschiedene Zahlen der Blaswindungen

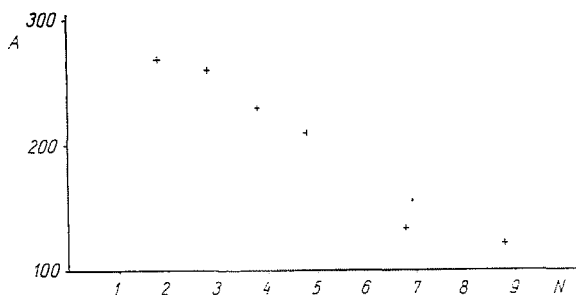


Abb. 15. Die Konstanten A der Hyperbeln in Abhängigkeit von der Zahl der Blaswindungen

Konstante »A« und der Zahl der Blaswindungen besteht, so ergibt sich die Formel

$$A = 14,5 (21 - N).$$

Weitere Messungen bei der Windungszahl $6\frac{3}{4}$ würden wahrscheinlich höhere Bogendauerwerte ergeben, doch würde dies bedeuten, daß sich die den $6\frac{3}{4}$ -Windungen zugehörige Konstante »A« der Geraden nähern wird.

5. Lichtbogen-Löschdauer ohne magnetische Blasung

Wie erwähnt, wurden die Bogendauerwerte auch bei Fortfall der magnetischen Löschung bestimmt und in der Tabelle für $N = 0$ zusammengefaßt.

Die sehr hohen Bogendauerwerte, z. B. $t = 456$ s bei $I = 34,5$ A sind auffallend. In solchen Fällen steht der Lichtbogen. Die Lichtbogenspannung bleibt während der Dauer des Lichtbogens unverändert und hilft nicht mit, den Lichtbogen zu löschen. Der Lichtbogen brennt nun, solange sich nicht

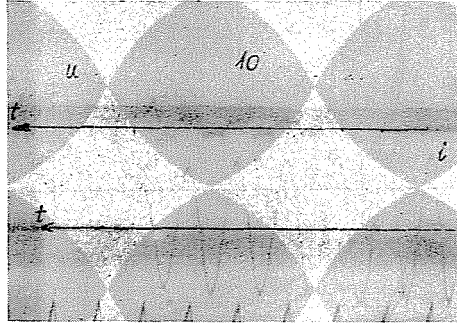


Abb. 16. Langsame, unsichere Lichtbogenlöschung, ohne Bogenblasung, bei $N = 0$, $I = 34,5$ A

zufällig ein günstiger Nulldurchgang des Stromes ergibt, bei welchem die dielektrische Festigkeit des Elektrodenzwischenraumes die Beanspruchung durch die Einschwingspannung übersteigt. Hierzu bedarf es aber eines günstigen Zusammentreffens mehrerer Faktoren (Luftbewegung, Bewegung des Licht-

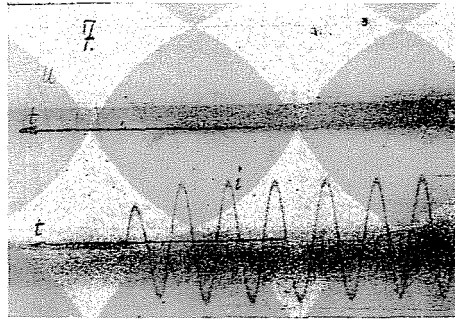


Abb. 17. Sichere Lichtbogenlöschung mit schnell anwachsenden Lichtbogenspannung, bei kurzer Lichtbogendauer $N = 3\frac{3}{4}$, $I = 120$ A

bogens unter dem Einfluß der Kaminwirkung, Verhalten der Ladungsträger). Dies ergab sich in diesem Falle beim 46. Nulldurchgang. In zwei Fällen wurde die dielektrische Festigkeit für kurze Zeit hergestellt, der Strom fiel plötzlich zurück, doch erfolgte eine abermalige Zündung im absteigendem Ast der wiederkehrenden Spannung. Nähert man die Mittelwerte mit einer Hyperbel an, so ergibt sich für $N = 0$ ein $A = 656$.

Gegenüber der unsicheren Löschung bei schwachen Strömen, ergeben sich bei $I = 120$ A und darüber sichere Löschungen. Die Lichtbogen dauern

zwar lang, doch bewegen sie sich. Es erscheint zweckmäßig, die beiden Arten von Löschungen als passive und aktive Löschung zu bezeichnen.

Unter *passiver Löschung* ist jene zu verstehen, bei der an dem bereits gezündeten Lichtbogen keine Änderung auftritt, die zur Löschung beitragen könnte. Der Lichtbogen brennt relativ stabil und erlischt nur beim Zusammentreffen günstiger Verhältnisse, welches jedoch völlig unsicher ist. Der Lichtbogen kann auch stehen bleiben, wodurch Störungen und Betriebsunterbrechungen auftreten können. Eine derartige Löschung ist in Abb. 16 zu sehen, aus der eindeutig hervorgeht, daß dieser Fall bei $t > 50$ ms eintritt.

Bei der *aktiven Löschung* ergeben sich Änderungen, die die Löschung fördern, wobei die Lichtbogenspannung wächst und $t < 50$ ms. Eine derartige Änderung ist in Abb. 17 dargestellt.

6. Untersuchung der Lichtbogenspannung

Nach Auswertung der Lichtbogendauer, wurden die Oszillogramme weiter geprüft, um den Wert der Lichtbogenspannung im Moment der Lichtbogenlöschung festzustellen. Jedes der Oszillogramme wurde ausgewertet, wonach der Mittelwert von 4 bis 6 zu einem Meßpunkt gehörenden Meßwerte errechnet wurde. Wie bei den Lichtbogendauerwerten, ergibt sich auch hier eine Streuzone. Das Verhältnis der maximalen zu den minimalen Werten liegt bei 1 : 1,5—1,6.

Die so erhaltenen Lichtbogenspannungen wurden mit dem Scheitelwert der Netzspannung verglichen und die Relativwerte

$$a = \frac{U_{Bo}}{U_{\text{Netz max}}} \quad (8)$$

in eine Tabelle zusammengefaßt. (Um eine einheitliche Tabelle zu erhalten, wurden geringe Differenzen in der Einstellung der Stromwerte vernachlässigt.)

$I =$ N	34,5	58	80	120...129	192	354 [A]
$1\frac{3}{4}$	—	0,49	0,541	0,65	0,705	0,65
$2\frac{3}{4}$	—	0,529	0,603	0,62	0,65	0,67
$3\frac{3}{4}$	0,356	0,516	0,51	0,62	0,708	0,671
$4\frac{3}{4}$	0,404	0,55	0,53	0,635	0,663	0,736

Es ergeben sich zwar in der Tabelle einige Überlappungen, dennoch aber zeigt sich klar, daß die relative Lichtbogenspannung mit wachsendem Strom ebenfalls wächst. Dies ist auch durchaus verständlich, da die Rückzündspannung laut Angaben der einschlägigen Literatur mit wachsender Stromstärke sinkt. Die Einschwingspannung richtet sich nach der Phasenlage von Strom und Spannung. Der Zeitabstand zwischen Strom- und Spannungs-

nulldurchgang ist um so kleiner, je größer die Lichtbogen­spannung ist. Bei schwachem Strom erwirkt daher schon ein relativ kleines Ansteigen der Bogen­spannung das Erlöschen des Bogens. Wie man sieht, wächst »A« mit der Stromstärke, während sein Wert von der Zahl der Blaswindungen praktisch unabhängig ist. Die lange Brenndauer bei kleinen Strömen ist dadurch bedingt, daß zum Erreichen der nötigen Bogen­spannung eine gewisse Zeit nötig ist.

Anhand der bekannten Lichtbogen­spannung und der Lichtbogendauer kann auch die Steilheit der durchschnittlichen Lichtbogen­spannung fest­gestellt werden, da

$$m = \frac{U_{\text{lmax}}}{t} \quad [\text{V/ms}] . \quad (9)$$

Auf diese Weise ergibt sich nur die durchschnittliche Steilheit, weil während der Brenndauer Perioden vorkommen, in denen die momentane Steilheit der Lichtbogen­spannung vom Durchschnittswert abweicht. Die punkt-

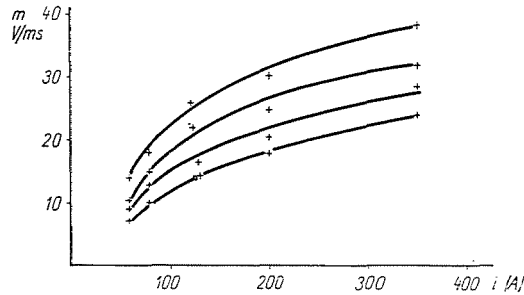


Abb. 18. Die aus Oszillogrammen festgestellten Steilheiten der durchschnittlichen Lichtbogen­spannung, bei verschiedenen Blaswindungszahlen, in Abhängigkeit der Stromstärke

weise festgestellten Mittelwerte der Steilheit der Lichtbogen­spannung sind in Abb. 18 aufgetragen. Werden die Lichtbogendauerwerte mit der Steilheit verglichen, so ergibt sich, daß eine Löschung innerhalb einer Halbwelle ($t < 10$ ms) nur bei $m > 25$ V/ms erfolgt.

Die magnetische Induktion wurde entlang des Strompfades gemessen. Zu diesem Zwecke wurde eine kleine Meßspule, mit einem Durchmesser $d = 5$ mm angefertigt. Die Spule wurde bei geschlossenem Schalter auf den einen Kontakt aufgesetzt, worauf die induzierte Spannung an den Klemmen der Spule gemessen wurde. Die Spulenebene lag stets parallel zu den Blechen des Blasmagneten. Sodann wurde die Spule in ein langes Solenoid gelegt, wodurch der Zusammenhang zwischen Induktion und gemessener Spannung bestimmt werden konnte.

Die Messung wurde an 6 verschiedenen Punkten entlang der Bewegungs­bahn des Lichtbogens mit $4\frac{3}{4}$ Blaswindungen durchgeführt. Die einzelnen

Meßpunkte wurden gemäß Abb. 17 numeriert. Mit Ausnahme des Meßpunktes 1 bleibt die Induktion in den Meßpunkten 2 bis 6 praktisch konstant. In Abb. 19 sind die in der Mittellinie der Kontakte gemessenen Induktionen aufgetragen. An den beiden Rändern der Kontakte erreicht die Induktion das 1,5fache der Induktion in der Mittellinie.

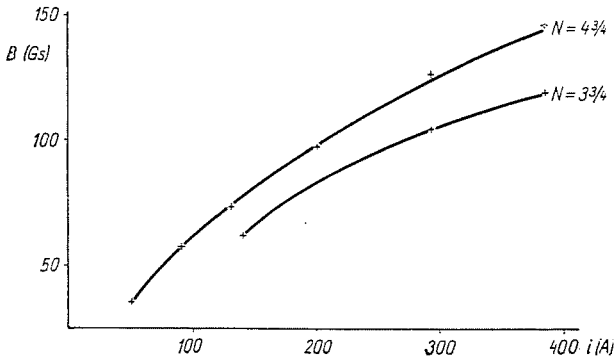


Abb. 19. Die entlang der Lichtbogen gemessenen Induktionen in Abhängigkeit der Stromstärke bei $N = 4\frac{3}{4}$ Blaswindungen

Es kann festgestellt werden, daß ein enger Zusammenhang zwischen der Induktion und der Steilheit der Lichtbogenspannung besteht. Bei der untersuchten Einrichtung gilt für diesen Zusammenhang

$$m = KB, \quad (10)$$

wobei

m in V/ms und

B in Gauß und die Konstante mit $K = 0,3$ einzusetzen sind.

Als Beispiel kann nun die Frage gestellt werden, in welchem Verhältnis bei $3\frac{3}{4}$ -Blaswindungen die den Stromwerten von 58 und 354 A zugehörigen Lichtbogendauerwerte zueinander stehen werden? Die Werte von » a « betragen der Tabelle gemäß 0,51 bzw. 0,67. Die Steilheiten sind gemäß Kurve 3 der Abb. 18 10,1, bzw. 31,6 V/ms. Die Berechnung ergibt also

$$\frac{t_{58}}{t_{354}} = \frac{m_{354}}{m_{58}} \quad \frac{a_{58}}{a_{384}} = \frac{31,6}{10,1} \quad \frac{0,51}{0,67} = 2,4.$$

Die in diesen beiden Punkten gemessenen Durchschnittswerte der Lichtbogendauer ergeben

$$\frac{29,7}{13,2} = 2,26,$$

wogegen sich aus den Gleichungen der Hyperbeln ein Verhältnis von 2,47 errechnen würde. Es ist somit gelungen, aus den schwer erfaßbaren, starke Streuung aufweisenden Größen zu einem realen Ergebnis zu gelangen.

Eine Wiederholung des Beispiels durch Vergleich der Lichtbogendauerwerte bei $1\frac{3}{4}$ Windungen und bei 80 und 192 A zeigt folgendes Bild:

$$\frac{t_{80}}{t_{192}} = \frac{17,9}{11} \cdot \frac{0,54}{0,705} = 1,25.$$

Die gemessenen Durchschnittswerte ergeben

$$\frac{26,1}{20,6} = 1,27$$

Auf Grund der Hyperbeln erhält man

$$\frac{t_{76}}{t_{196}} = 1,55$$

Auch dieses Ergebnis kann noch als eine angemessene Annäherung angesehen werden, zumal sämtliche Faktoren der Berechnung auf Grund zahlreicher, mit großer Streuungsmöglichkeit behafteten Messungen bestimmt wurden.

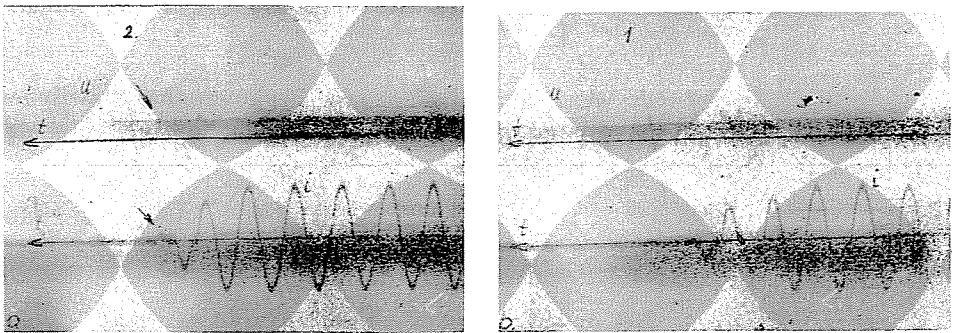


Abb. 20. Ausschalt Oszillogramme bei $N = 3\frac{3}{4}$, $I = 80$ A

Es soll hier noch auf eine interessante Erscheinung hingewiesen werden, die an einigen Oszillogrammen beobachtet werden konnte. Wie bereits erwähnt, wächst bei der Löschung mit langen Lichtbogen in erster Linie nicht die dielektrische Festigkeit zwischen den Kontakten, vielmehr sinkt die Einschwingspannung unter ihren kritischen Wert. Es bietet sich also Gelegenheit, auch die Rückzündung zu studieren, so z. B. an den Oszillogrammen der Abbildungen 20a und 20b, die bei $i = 80$ A und $N = 3\frac{3}{4}$ aufgenommen wurden. Aus Abbildung 20a ist ersichtlich, daß die Rückzündung immer später erfolgt und die stromlose Pause immer länger wird. In der letzten Halbwelle des Löschvorganges kehrt die Netzspannung für eine kurze Periode zurück, doch erfolgt eine letzte Rückzündung im abfallenden Ast der Spannungskurve. Der Spitzenwert der letzten Stromhalbwelle beträgt 37% des Spitzenwertes des ursprünglichen Stromes.

Besonderes Interesse verdient die Abb. 20b, die eine Rückzündung nach einer Pause von ungefähr 6...7 ms mit einem sehr niedrigen Stromspitzenwert zeigt, der vielleicht nur 8...10% des vollen Stromes erreicht. Der Überschlag erfolgte beim Halbwert der Netzspannung.

7. Auswertung

Die Messungen haben die charakteristischen Merkmale der Löschung mit langem Lichtbogen zum Vorschein gebracht, u. zw. in dem Sinne, daß mit schwachen Strömen lange Löschdauerwerte verbunden sind. Ähnlich verhält es sich auch bei anderen Konstruktionen, die auf demselben Prinzip basieren.

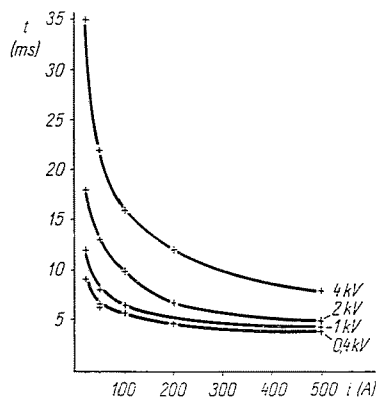


Abb. 21. Lichtbogendauer eines durch Büchner entwickelten Schalters mit Löschung durch langem Lichtbogen, in Abhängigkeit der Stromstärke, bei verschiedenen Spannungen [2]

Als Beispiel soll das Diagramm BÜCHNERS in Abb. 21 dienen, das die Lichtbogendauer bei unterschiedlichen Spannungen in Abhängigkeit vom Strom zeigt und dessen Kurven sehr nahe bei unseren Kurven verlaufen. Da BÜCHNER ein Hochspannungs-Schaltgerät untersuchte, verlagerten sich die Lichtbogendauerwerte parallel nach unten.

Will man von ähnlich aufgebauten Schaltern informative Daten gewinnen, so sind die nötigen Schritte die folgenden:

1. Aus den Abmessungen des Blasmagneten ergibt sich die Induktion.
2. Die Steilheit der Lichtbogenspannung wird durch die Induktion bestimmt.
3. Der Verlauf des Unterbrechungsstromes kann aus der Steilheit der Lichtbogenspannung aufgetragen und aus diesem die Lichtbogendauer annähernd ermittelt werden.

Es erscheint hierbei vorteilhaft, die Berechnung für den kritischen Strom durchzuführen und die Grenzen für dessen Ausschaltdauer zu bestimmen.

Für magnetische Schütze derselben Type können die Werte für die Konstante »A« dem Diagramm der Abb. 15 entnommen werden. In der Konstante »A« spielen auch die Spannung und der Leistungsfaktor eine gewisse Rolle, doch bildete die Bestimmung ihres Einflusses diesmal nicht die Aufgabe der Untersuchung. Jedenfalls ist es klar, daß die Lichtbogendauer auch bei sinkender Spannung und bei besserem Leistungsfaktor abnehmen wird.

Die Auswertung der Meßreihe war nicht leicht, da die Ausschaltungen nicht von einem Synchronschalter gesteuert wurden. Demgegenüber haben jedoch die Messungen die in der Praxis auftretenden Streuungen zum Vorschein gebracht.

Die Versuche haben gezeigt, daß sich die Lichtbogendauer im untersuchten Bereich von 34...350 A in Abhängigkeit von der Stromstärke einer Hyperbelfunktion gemäß ändern. Die Konstante »A« der Hyperbelen steht in verkehrtlinearem Verhältnis zu der Windungszahl der Blaspule. Bei schwachen Strömen und kleinen Blaswindungen kann der Lichtbogen auch stehen bleiben.

Die Theorie ist im allgemeinen noch außerstande quantitative Angaben im Zusammenhang mit der Lichtbogenlöschung zu geben, doch beschreibt sie das Wesen der Erscheinung und gibt ein Bild von der Wirkung der beeinflussenden Faktoren. Die wichtigsten Informationen können unter solchen Umständen durch Messungen erhalten werden. Sodann folgt die Aufgabe, die Messungen auszuwerten und die Gesetzmäßigkeiten festzustellen. Viel Zeit kann erspart werden, wenn die Gleichung der zu erwartenden Kurve mit Hilfe des Minimums der Fehlerquadrate bestimmt wird.

Zur Löschung mit langem Lichtbogen kann festgestellt werden, daß bei steigender Stromstärke im Moment des Erlöschens eine höhere Lichtbogen- spannung entsteht. Die Lichtbogendauer wird dennoch kürzer ausfallen, weil bei der Löschung im Bereich zwischen 34,5...354 A die Lichtbogen- spannung auf das 1,8fache anwächst, wogegen die Ausdehnungsgeschwindigkeit des Lichtbogens mit der Stromstärke schneller wächst. Laut EIDINGER und RIEDER schreibt sich die Formel der Ausdehnungsgeschwindigkeit des Lichtbogens zu $v = Ki^{-0,61} H^{-0,74}$. Da das magnetische Feld in der Nähe der Kontakte mit dem Feld des Blasmagneten zusammenwirkt, könnten angenommen werden, daß die Potenz der Stromstärke höher, u. zw. bei etwa 0,7...0,8 liegen wird. Wenn nun auf diese Weise untersucht wird, in welchem Verhältnis sich die Lichtbogendauer zwischen den beiden Stromstärken verkürzen sollte, so ergibt sich

$$\frac{t_{34,5}}{t_{354}} = \frac{1}{1,8} \left(\frac{354}{34,5} \right)^{0,75} = 3,2.$$

Die Messungen ergaben eine Verkürzung der Lichtbogendauer, die fast genau mit der berechneten übereinstimmt. Auf Grund der Näherungs-Hyperbelen

beträgt dieses Verhältnis 3,21 wogegen sich das Verhältnis der durchschnittlichen Lichtbogendauerwerte bei $4^{3/4}$ Windungen auf 3,6 und bei $3^{3/4}$ Windungen auf 3,5 stellt. Man kommt daher zu dem Ergebnis, daß die Geschwindigkeit des Anwachsens der Lichtbogenspannung, das heißt der Lichtbogenlänge bei einer gegebenen Blaswindungszahl der Potenz 0,75 der Stromstärke proportional ist.

Wie aus der Tabelle auf Seite 139 ersichtlich, ist die relative Lichtbogenspannung im untersuchten Bereich

$$a \simeq (0,16-0,18) i^{0,25}.$$

Dies ist auch durchaus verständlich, da stärkeren Strömen kleinere Rückzündspannungen zugehören und daher bei stärkeren Strömen im Moment des Erlöschens des Lichtbogens der Leistungsfaktor des Stromkreises wirksamer verändert werden muß.

Wie bereits gezeigt, kann der Quotient der Lichtbogendauer für zwei verschiedene Stromstärken wie folgt geschrieben werden:

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{a_1}{a_2} \left(\frac{i_2}{i_1} \right)^{0,75} = \frac{1}{\left(\frac{i_2}{i_1} \right)^{0,75}} \left(\frac{i_2}{i_1} \right)^{0,75} = \left(\frac{i_2}{i_1} \right)^{0,5}.$$

Dieses Ergebnis unterstützt die bei der Aufzeichnung der Hyperbeln gemachte Annahme, daß bei der Darstellung der Meßergebnisse als Potenz 0,5 zu wählen ist.

Natürlich ist die in den Rechnungen benützte Potenz von 0,75 nur annähernd gültig. Wie betont, dürfte sie zwischen 0,7 und 0,8 liegen. Es sollte daher genauer gesagt werden, daß die Lichtbogendauer von Schützen mit magnetischer Blasung durch die Formel

$$t = \frac{A}{I^B}$$

ausgedrückt werden könnte, wobei die Potenz B für $i > 30$ A — dem Gesagten entsprechend — zwischen 0,45 und 0,55 liegen dürfte.

Schütze mit Bogenblasung, die auf Grund des Lichtbogenlöschens mit langem Lichtbogen arbeiten, haben einen ausgeprägten kritischen Strom von $I_K = 20 \dots 30$ A, bei einer Spannung von $U = 380$ V und bei einpoliger Unterbrechung. Für Stromwerte oberhalb des kritischen Stromes verkürzt sich die Lichtbogendauer zusehends. Mit wachsender Zahl der Blaswindungen werden die Konstanten A der Hyperbeln zur Beschreibung der Lichtbogendauer immer kleiner. Die Konstanten A der Hyperbeln wurden aus den gemessenen Lichtbogendauerwerten nach dem Verfahren des Minimums der Fehlerquadrate bestimmt.

Zu wachsenden Strömen gehören im Moment des Erlöschens wachsende Lichtbogenspannungen. Diese Spannung wächst mit den vierten Wurzel der Stromstärke. Die Steilheit der Lichtbogenspannung ist proportional der Induktion, gemessen entlang der Lichtbogenbahn.

Jede Angabe beruht auf dem Vergleich mehrerer Meßergebnisse. Die erwähnten Werte sind Mittelwerte, die von einem weiten Bereich umgeben sind. Die Breite des Bereiches liegt bei 50...100% des Mittelwertes.

Die Streuung der Lichtbogendauerwerte wird nicht nur dadurch verursacht, daß das Ausschalten in verschiedenen Phasenlagen beginnt, vielmehr

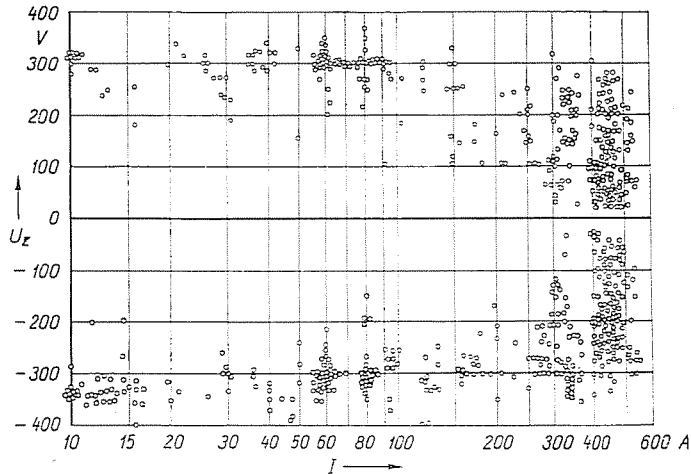


Abb. 22. Werte der Rückzündspannung nach Erlöschen des Stromes in Abhängigkeit der Stromstärke [3]

spielen auch weitere Gründe mit. Die Induktion ist am Rande des Kontaktes viel höher als in der Mitte, folglich bewegt sich dort der Lichtbogen wesentlich schneller. Ebenso wird die Rückzündspannung durch viele Faktoren beeinflusst.

Abb. 22 zeigt die von K. BERGOLD gemessenen Werte der Rückzündspannung eben in dem hier untersuchten Strombereich. Die Streuung ist auch hier sehr groß, die gemessenen Werte liegen in einem weiten Bereich. Dennoch läßt die Abbildung erkennen, daß wachsenden Strömen abnehmende Rückzündspannungen zugehören.

Es soll nun auf Grund der Abbildungen 5 und 6 untersucht werden, wie sich das Verhältnis der Lichtbogenspannung zur wiederkehrenden Spannung in den Momenten der aufeinanderfolgenden Nulldurchgängen des Stromes gestaltet.

Bei Ausschaltung in der Lage $\alpha = 0^\circ$

Bogenspannung		wiederkehrende Spannung
$t = t_1$	$U_1 = 170 \text{ V}$	$U_{v1} = 470 \text{ V}_{\max}$
t_2	$U_2 = 340 \text{ V}$	$U_{v4} = 300 \text{ V}_{\max}$
t_3	$U_3 = 510 \text{ V}$	$U_{v3} = 110 \text{ V}_{\max}$

Bei Ausschaltung in der Lage $\alpha = 90^\circ$

$t = t_1$	$U_1 = 90 \text{ V}$	$U_{v1} = 533 \text{ V}_{\max}$
t_2	$U_2 = 250 \text{ V}$	$U_{v2} = 380 \text{ V}_{\max}$
t_3	$U_3 = 420 \text{ V}$	$U_{v3} = 170 \text{ V}_{\max}$

Die in der Abb. 22 für 85 A Stromstärke angegebenen Werte der Rückzündspannung begründen diese stark fallende Tendenz der wiederkehrenden Spannung und auch den Umstand, daß die Lichtbogenspannung bei stärkeren Strömen höhere Werte annehmen muß. Der Grund hierfür liegt darin, daß dadurch eine niedrigere Rückzündspannung entsteht, was der Abb. 22 gemäß auch nötig erscheint. Aus obiger Tabelle geht hervor, daß die wiederkehrende Spannung mit wachsender Lichtbogenspannung abnimmt. Bei wachsenden Strömen muß daher die Lichtbogenspannung in dem Maße wachsen, in welchem die Rückzündspannung abnimmt. Bei dem untersuchten Schalter kommen die sehr niedrigen Werte der Rückzündspannung gemäß Abb. 22 nicht zur Geltung, da die Bogenbewegung bei stärkeren Strömen zu groß wird. Zieht man dies in Betracht, so kann Abb. 22 auch als Bestätigung für die Werte der Tabelle der relativen Lichtbogenspannungen angesehen werden.

Zusammenfassung

Die Arbeitsweise des mit langen Lichtbogen löschenden Schalters beruht auf dem Absinken der wiederkehrenden Spannung. Diesem Zweck dient die Induktion des Blasmagneten, die die Steilheit der Lichtbogenspannung ansteigen läßt, was andererseits auch die wiederkehrende Spannung herabsetzt. Beim Löschen des Lichtbogens ist nicht nur die Rückzündung von Belang, vielmehr sind hierbei auch die thermischen Verhältnisse ausschlaggebend. So kann bei sehr kleinen Strömen der Lichtbogen ausgelöscht, wenn nach der Rückzündung die Bedingungen für seinen Fortbestand nicht vorhanden sind.

Bei einem gegebenen Blasmagneten werden die Werte der Lichtbogendauer durch die Formel

$$t = AI^{-0,5}$$

angegeben. Die Konstante A nimmt mit der Zahl der Blaswindungen fast linear ab. Die Lichtbogendauer erreicht beim kritischen Strom das 3 bis 4fache desjenigen, der bei der Höchststromstärke gemessen wurde.

Literatur

1. FRANKEN, H.: Schütze und Schützensteuerungen. Springer Verlag, Berlin — Göttingen — Heidelberg, 1952.
2. BÜCHNER, G.: Verlängern von Lichtbögen mit Hilfe magnetischer Felder zum Unterbrechen von Wechselströmen. ETZ. A. **80** 71 (1959)
3. BERGOLD, K.: Dynamisches Verhalten des elektrischen Niederstrombogens. ETZ. A. **82** 161 (1961)
4. MOLNÁR, F.: Ívoltás kisfeszültségű váltakozóáramú kapcsolókészülékekben. — Elektrotechnika. **54** 128 (1961)
5. MAYR, O.: Beiträge des statischen und des dynamischen Lichtbogens. Archiv für Elektrotechnik, **37**, 588 (1943)
6. EIDINGER, A.—RIEDER, W.: Das Verhalten des Lichtbogens im transversalen Magnetfeld. Archiv für Elektrotechnik, **43**, 94 (1957/58)

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