Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 64 (1973)

Heft: 10

Artikel: Über die Wiederverfestigung von Lichtbogenstrecken in Löschkammern mit Eisenblechen

Autor: Lindmayer, M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915553

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Über die Wiederverfestigung von Lichtbogenstrecken in Löschkammern mit Eisenblechen

Von *M. Lindmayer*

621.316.5.064.42

Die Wechselstrom-Lichtbogenlöschung in kompakten Deion-Löschkammern mit Eisenblechen im Strombereich mehrerer kA erfolgt im Mittel dann, wenn die Einschwingspannung den Wert der Wiederverfestigungsspannung nicht überschreitet. Dies wurde durch experimentelle Ermittlung der Löschhäufigkeit bei unterschiedlichen Spannungen nachgewiesen. Die Wiederverfestigungsspannung stellt die Summe aus der elektrischen Festigkeit der zuerst durchschlagenen Kathodenschicht und den Spannungsabfällen an den übrigen Kathodenschichten und Teilbogensäulen dar. Sie nimmt mit steigender Einschwingfrequenz bis auf einen konstanten Wert bei höheren Frequenzen ab. Sie steigt mit der Zahl der in Serie geschalteten Teilbögen schwächer als proportional, nimmt mit fallender Stromstärke und steigender Löschblechgrösse zu und kann durch gasabgebendes Wandmaterial deutlich erhöht werden.

L'extinction d'un arc de courant alternatif de plusieurs kA dans une chambre de déionisation avec tôles de fer, a lieu généralement lorsque la tension transitoire ne dépasse pas la tension de reconsolidation. Cela a été prouvé en déterminant par des essais la fréquence des extinctions sous différentes tensions. La tension de reconsolidation représente la somme de la rigidité diélectrique de la couche cathodique qui a été perforée en premier lieu et des chutes de tension aux autres couches cathodiques et colonnes d'arc partielles. Elle augmente avec la fréquence de la tension transitoire jusqu'à une valeur qui devient constante aux fréquences élevées. Elle augmente moins que proportionnellement avec le nombre des arcs partiels en série, diminue avec la diminution de l'intensité du courant et l'augmentation de la grandeur des tôles d'extinction. Elle peut être nettement augmentée par la matière des parois qui développe du gaz.

1. Einführung

In Wechselstromschaltgeräten der Niederspannungstechnik lassen sich zwei Löschprinzipien unterscheiden. Bei dem in Leitungsschutzschaltern und strombegrenzenden Leistungsschaltern eingesetzten Gleichstromlöschprinzip wird durch rasche Erhöhung der Lichtbogenspannung über die treibende Spannung hinaus der Strom vorzeitig zu Null gezwungen. Hierauf soll nicht näher eingegangen werden.

Das Wechselstromlöschprinzip, auch als Nullpunktlöschung bezeichnet, beruht darauf, dass eine Wiederzündung unter dem Einfluss der Einschwingspannung, die nach dem Nullwerden des Wechselstromes an der Schaltstrecke mit entgegengesetzter Polarität ansteigt, verhindert wird.

Die Wiederzündung eines Lichtbogens kommt unter den in Wechselstrom-Niederspannungs-Schaltgeräten vorliegenden Verhältnissen unter zwei Bedingungen zustande:

1. An der vor dem Stromnullwerden anodischen Elektrode muss ein Bogenkathodenmechanismus gebildet werden, d.h. die noch nicht vorhandenen Bedingungen für eine ausreichende Elektronenemission an der Kathode müssen geschaffen werden. Wie erstmals *Slepian* [1][1]) feststellte, bildet sich unter dem Einfluss der Einschwingspannung eine positive Raumladungsschicht vor der neuen Kathode, die, je nach Elektrodenmaterial, Stromstärke und Einschwingfrequenz, eine Spannung bis zu einigen 100 V aufnehmen kann, bevor nach Erreichen ihrer elektrischen Festigkeit ein Durchschlag zur Bildung einer Bogenkathode, eventuell über ein Glimmzwischenstadium, führt. Bereits unmittelbar nach dem Stromnullwerden ist diese Festigkeit vorhanden («Sofortverfestigung»). Sie ist vom Elektrodenmaterial abhängig und nimmt mit wachsender thermischer Belastung der Fusspunkte ab [2]...[5].
2. Zusätzlich muss der Leitwert der damit in Serie geschalteten Plasmasäule infolge Wiederaufheizung so zunehmen, dass sie ihren Lichtbogensäulen-Charakter beibehält oder wiedererlangt.

Entsprechend diesen Möglichkeiten lassen sich zwei Löschmechanismen gegenüberstellen:

1. Die Einschwingspannung bleibt unterhalb der Kathodenschichtfestigkeit, die Löschung erfolgt, obwohl der Leitwert der Säule zur Wiederzündung ausreichend wäre. Dieser Mechanismus ist für die Löschung kurzer Bögen zwischen einfachen Kontaktstücken [4], die in Schaltgeräten für Stromstärken bis zu mehreren 10 A vorliegen, entscheidend.
2. Trotz Bildung eines Kathodenmechanismus geht der Säulenleitwert infolge Überwiegens der Abkühlung über die elektrische Energiezufuhr gegen Null. Dieser energetische Mechanismus ist beispielsweise für die Löschung von Bögen mehrerer cm Länge in Isolierstoffspaltkammern [6] oder in Kammern, deren Löschbleche wegen ihres geringen Abstandes lediglich als Kühlbleche wirken, verantwortlich und kann durch dynamische Lichtbogentheorien (z.B. [7]) annähernd beschrieben und berechnet werden.

Bei Niederspannungsschaltgeräten, deren Aufgabe die Ausschaltung im kA-Bereich ist, sind kompakte Löschkammern mit Löschblechen, meist aus Eisen, weit verbreitet, die, neben der Kühlung, eine Aufteilung des Schaltlichtbogens in mehrere Serienbögen bewirken (Deion-Prinzip). Nach *Slepian,* der dieses Prinzip erstmals genauer an relativ grossen Messing- und Kupferblechen bei hohen Bogenwanderungsgeschwindigkeiten untersuchte [8], bewirkt die Serienschaltung mehrerer sofort verfestigender Kathodenstrecken die Löschung. Es galt jedoch als keineswegs sicher, ob dieser Effekt auch in kompakten Löschsystemen mit relativ kleinen Eisenblechen, auf denen die nur geringe Bogenbewegung zur starken Aufheizung der Fusspunktgebiete führt, die Löschung bestimmt, oder ob der energetische Mechanismus der Lichtbogensäule hierfür verantwortlich ist, wie z.B. *Taev* [9] oder *Loh* [10] vermuteten.

Es wurden deshalb systematische Untersuchungen durchgeführt mit dem Ziel, den Lösch- bzw. Wiederzündmechanismus zu klären und die Abhängigkeit der Löschgrenzen von einer Reihe von konstruktiven, Material- und Stromkreisparametern festzustellen [11].

2. Versuchseinrichtung, Versuchsdurchführung

In Fig. 1 sind einige der verwendeten Versuchslöschkammern dargestellt, die nach dem Baukastenprinzip aus Einzelteilen zusammengesetzt sind. Die Kammerwände wurden, soweit erforderlich, aus durchsichtigen Werkstoffen gefertigt, um Zeitdehneraufnahmen zu ermöglichen. Als Vertreter hitzebeständiger Werkstoffe wurde eine Kombination aus Glas und Keramik, als gasendes Wandmaterial Acrylglas («Plexiglas») verwendet. Die Bezeichnung der Bauteile geht aus der Erläuterung zu Fig. 1 hervor. Der Antrieb der beweglichen Kontaktstücke erfolgte in einem speziellen, pneumatisch betriebenen Versuchsstand. Um reproduzierbare Messergebnisse zu erhal-

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

ten, wurden die Kontakte synchron unmittelbar nach dem natürlichen Stromnulldurchgang geöffnet (Trenngeschwindigkeit ≈ 1 m/s).

Fig. 2 zeigt den Übersichtsschaltplan des Prüfstromkreises. Seine Daten waren:

$U = 187{,}5...750$ V; $I = 2{,}5...8{,}5$ kA (Effektivwerte), eingestellt mit Luftdrosselspule L; $\cos\varphi = 0{,}31$; Einschwingfrequenz $f_e = 48...600$ kHz, eingestellt mit Kapazität C; Überschwingfaktor der unbeeinflussten Einschwingspannung $\gamma_e = 1{,}9$.

Da Messungen an Lichtbögen üblicherweise starken Streuungen unterworfen sind, wurden bei der Auswertung der Ergebnisse neben den arithmetischen Mittelwerten die Standardabweichungen bestimmt, die ein Mass für die Messwertstreuung sind.

3. Lichtbogenverhalten und charakteristische Oszillogramme

3.1 Beschreibung des Lichtbogenverhaltens

Die Zeit zwischen der synchronen Kontakttrennung und dem darauffolgenden Ende der 50-Hz-Halbperiode lässt sich in drei Bereiche unterteilen:

1. Die Zeit zwischen Beginn der Kontakttrennung und Wegwandern der Bogenfusspunkte von den Kontaktstücken («Verweilzeit»).
2. Die Zeit zwischen Verlassen der Kontaktstücke und dem ersten Stromnullwerden nach Kontakttrennung, in welcher die Unterteilung in Teilbögen erfolgt. Die Zahl N_T der in Serie geschalteten Teilbögen kann infolge unvollkommener Unterteilung beträchtlich von der maximal möglichen Zahl abweichen [10; 11]. Sie wird, ebenso wie die Verweilzeit, durch eine Reihe von Einflussgrössen bestimmt, über die bereits an anderer Stelle berichtet wurde [12].
3. Die Zeit kurz vor und insbesondere nach dem Stromnullwerden, in der sich die Löschung oder Wiederzündung entscheidet. Sie ist Gegenstand der folgenden Betrachtungen.

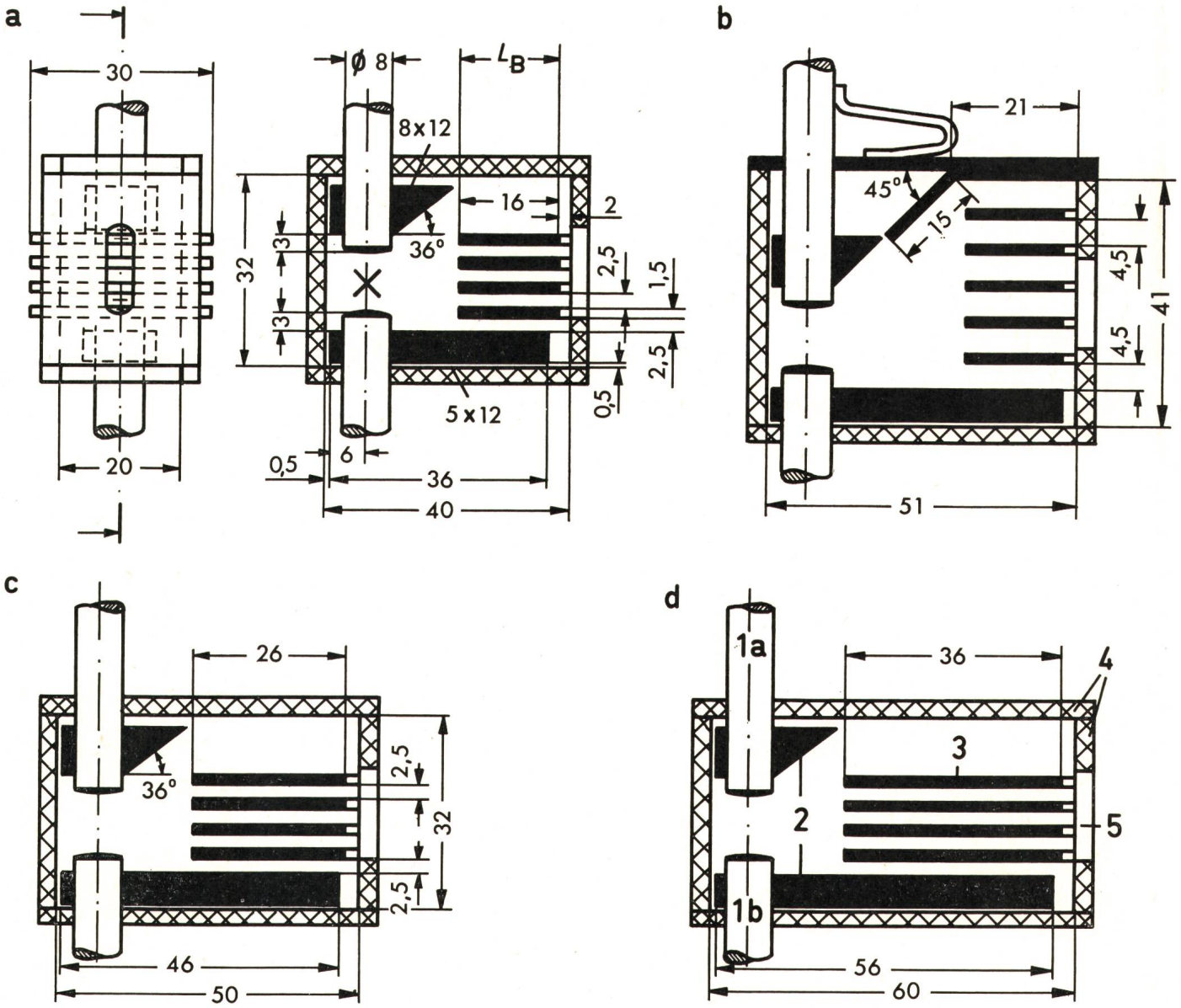

Fig. 1
Einige untersuchte Löschkammern

a mit 4 Löschblechen der Länge $L_B = 16$ mm
b mit 5 Löschblechen
c mit 4 Löschblechen, $L_B = 26$ mm
d mit 4 Löschblechen, $L_B = 36$ mm

zu *d*: *1* Kontaktstücke
a beweglich, *b* feststehend
2 Lichtbogenhörner aus Eisen
3 Löschbleche aus Eisen
4 Kammerwände
5 Ausblasöffnung

3.2 Charakteristische Oszillogramme im Stromnullbereich

In Fig. 3 sind einige charakteristische Strom- und Spannungsoszillogramme von Wiederzündungen und Löschungen gegenübergestellt:

In allen Fällen verläuft die Spannung vor Null, ausgehend von einem nur langsam veränderlichen oder nahezu konstanten Wert, häufig ohne thermische Löschspitze zu Null, wobei in manchen Fällen, bei Momentanstromstärken von wenigen A oder A-Bruchteilen, eine kurze impulsartige Erhöhung infolge rascher Stromverminderung («Chopping») eintreten kann. Der Strom – er wurde über einen 12-MHz-Koaxialshunt unter Zwischenschaltung eines Begrenzerverstärkers gemessen – wird im gleichen Zeitpunkt wie die Spannung gleich Null, da die Schaltstrecke im wesentlichen einen, wenn auch nicht konstanten Ohmschen Widerstand darstellt. Der Übergang von der Bogenentladung zum Einschwingvorgang erfolgt stetig und kann nicht genau definiert werden. Nach dem Nullwerden versucht die Spannung, mit entgegengesetzter Polarität auf den sich nur langsam ändernden Wert der Transformatorspannung einzuschwingen. Sie wird dabei durch einen Strom, der bereits unmittelbar nach Null, noch vor einem Kathodenschichtdurchschlag, zu fliessen beginnt, und der deshalb als Vorentladungsstrom bezeichnet werden kann, mehr oder minder gegenüber dem unbeeinflussten Verlauf gedämpft. Kontrollversuche ohne Kammerwände ergaben, dass dieser Strom tatsächlich über die Fusspunkte und den Bogenkanal fliesst.

In Fig. 3a erfolgt bei Erreichen eines als Wiederverfestigungsspannung u_F bezeichneten Wertes ein Zusammenbruch, der auf den elektrischen Durchschlag von zumindest einer Kathodenschicht hindeutet. Solche Zusammenbrüche sind, je nach Schaltstreckenwiderstand oder Kenngrössen des elektrischen Kreises, stets von impulsartigen oder schwingenden Ausgleichsströmen begleitet, die von der Entladung der Parallelkapazität herrühren.

Fig. 3b zeigt ein charakteristisches Beispiel für den allgemein beobachteten Verlauf der Wiederzündung bei mehreren Teilbögen, wobei die Kathodenschichten der einzelnen Teilbögen zeitlich aufeinanderfolgend durchschlagen werden. Als Wiederverfestigungsspannung wird hier die erste Spannungsspitze bezeichnet. Sie ist gleich der Durchschlagsspannung der zuerst durchschlagenen Kathodenschicht plus den Spannungsabfällen an den restlichen Kathodenschichten und Teilbogensäulen.

In Fig. 3c erfolgt kein Zusammenbruch, sondern ein plötzlicher Knick, der jedoch die gleiche Ursache hat und deshalb ebenfalls mit u_F gekennzeichnet ist. (Im Falle dieser Schaltung stand nur ein Lichtbogen ohne Unterteilung vor den Löschblechvorderkanten.)

Die Fig. 3d und 3e zeigen Oszillogramme von Löschungen, bei welchen die Einschwingspannung noch nicht zum Kathodenschichtdurchschlag geführt hat, wobei in Fig. 3d der über die Strecke fliessende Nachstrom zu einem aperiodischen Einschwingen auf die Transformatorspannung führt, während in Fig. 3e – wegen höherer Parallelkapazität bei etwa gleichem Strom – lediglich eine geringere Dämpfung der Schwingung stattfindet.

Fig. 3f zeigt eine Löschung mit abklingendem Nachstrom trotz Zusammenbruchs einer Kathodenschicht nach Erreichen von u_F. Die Spannung wird von den übrigen Kathodenschichten und Säulenteilen gehalten.

4. Ermittlung der Löschgrenze

Nimmt man an, dass die Wiederverfestigungsspannung u_F die für Löschung und Wiederzündung massgebliche Grenze ist, so muss eine Löschung dann erfolgen, wenn der Maximalwert

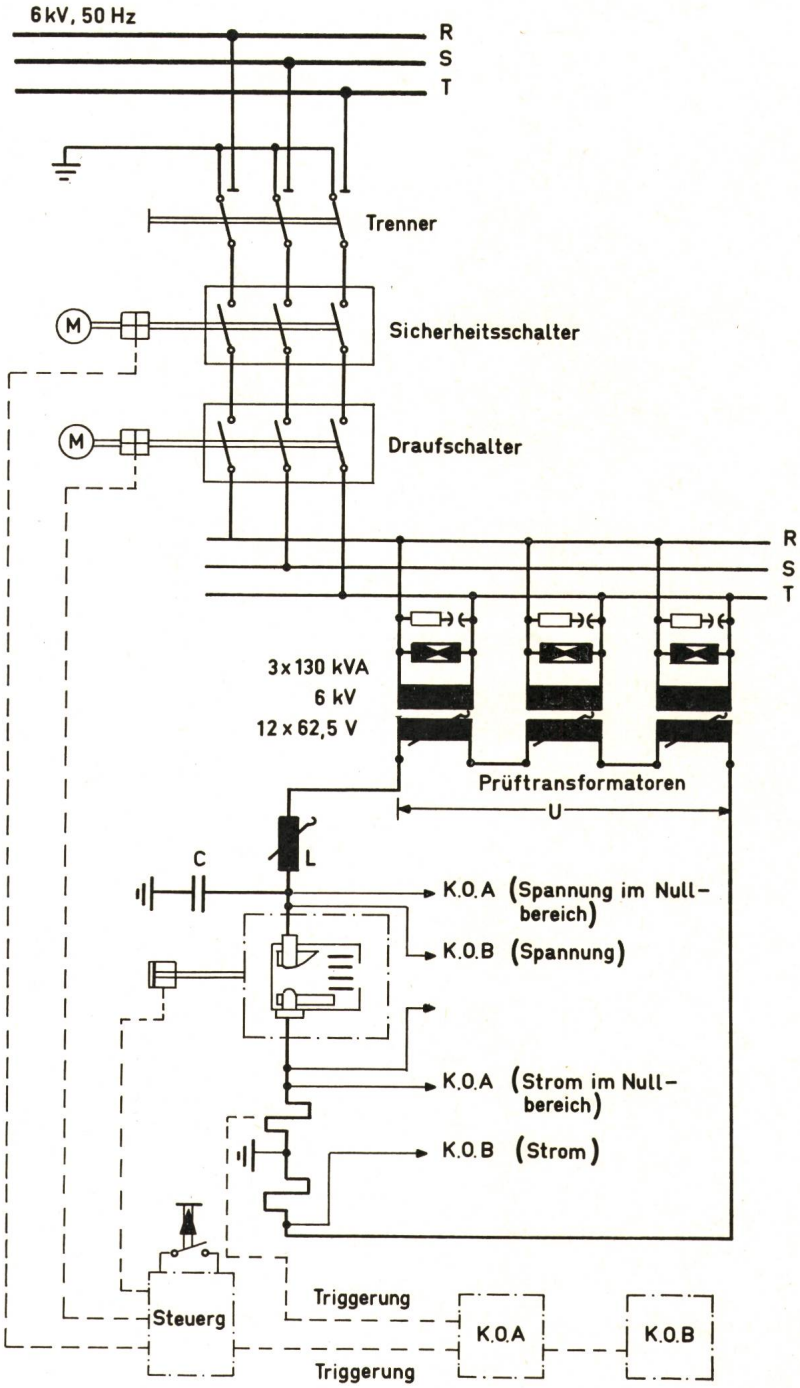

Fig. 2
Übersichtsschaltplan des Prüfstromkreises
U Transformatorspannung
L Luftdrosselspule zur Einstellung des Stromes
C Kapazität zur Einstellung der Einschwingfrequenz

der Einschwingspannung, $\gamma_e' U_S$, unter der Wiederverfestigungsspannung u_F liegt. γ_e' ist dabei der vom Schaltgerät beeinflusste, tatsächlich auftretende Überschwingfaktor, U_S die zum Zeitpunkt der Spannungswiederkehr anliegende treibende Transformatorspannung, die gegenüber dem raschen Einschwingvorgang praktisch konstant ist. Diese Bedingung gilt

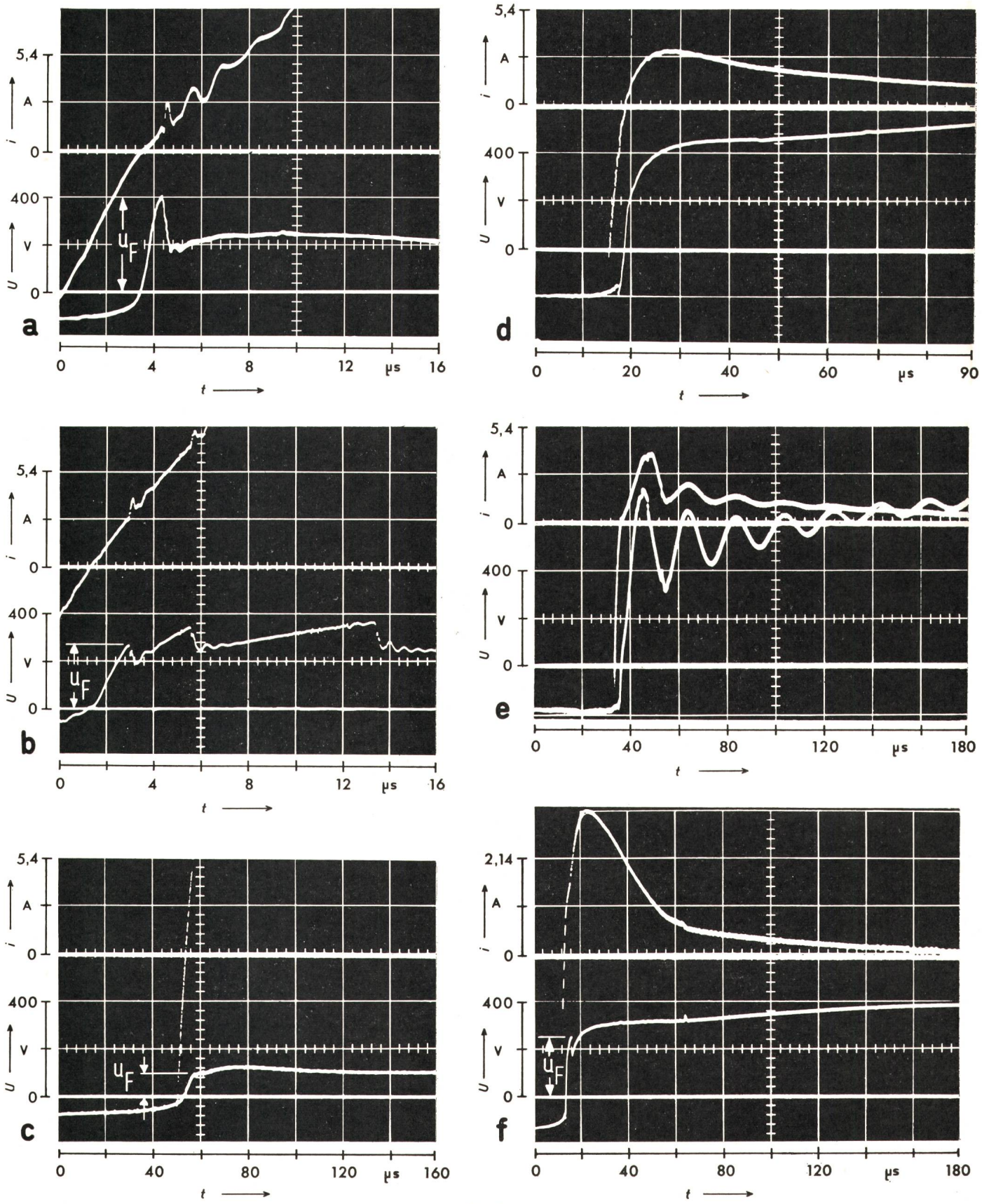

Fig. 3
Charakteristische Oszillogramme im Stromnullbereich

a, b, c	Wiederzündung	*i*	Strom über die Schaltstrecke
d, e, f	Löschung	*u*	Spannung an der Schaltstrecke
t	Zeit	u_F	Wiederverfestigungsspannung

unter der Voraussetzung, dass der zeitliche Anstieg der Wiederverfestigung rascher erfolgt als die Zunahme der Transformatorspannung. Bei den untersuchten Verhältnissen war dies der Fall.

Statistische Untersuchungen an einer grossen Zahl von Ausschaltversuchen zeigten, dass die Werte der Wiederverfestigungsspannung u_F annähernd normalverteilt sind. Die Verteilungsfunktion hierfür ist die s-förmig ansteigende Funktion

$$F(u_F) = \Phi\left(\frac{u_F - \bar{u}_F}{s}\right) \qquad (1)$$

($\bar{u}_F$ Mittelwert, s Standardabweichung, Φ Gaußsches Fehlerintegral.)

Die theoretische Löschhäufigkeit h_L, d.h. die Wahrscheinlichkeit, dass $\gamma_e' U_S < u_F$ ist, ergibt sich hieraus zu:

$$h_L(U_S) = 1 - \Phi\left(\frac{U_S - \bar{u}_F/\gamma_e'}{s/\gamma_e'}\right) \qquad (2)$$

Bei unterschiedlichen Transformatorspannungen und $I = 5$ kA wurden die Löschhäufigkeiten experimentell bestimmt. Fig. 4 zeigt das Ergebnis für gasendes Wandmaterial. Die Einschwingfrequenz betrug 300 kHz und lag damit in dem für die Löschung ungünstigen Bereich der Sofortverfestigung. Die Einschwingverhältnisse in Niederspannungsanlagen können in diesem Bereich liegen [13]. Wegen der geringen Parallelkapazität C bewirken hier die Nachströme über die Schaltstrecke meist eine aperiodische Dämpfung, so dass $\gamma_e' \approx 1$ ist. Der schraffierte Bereich in Fig. 4 kennzeichnet den sich aus Gl. (2)

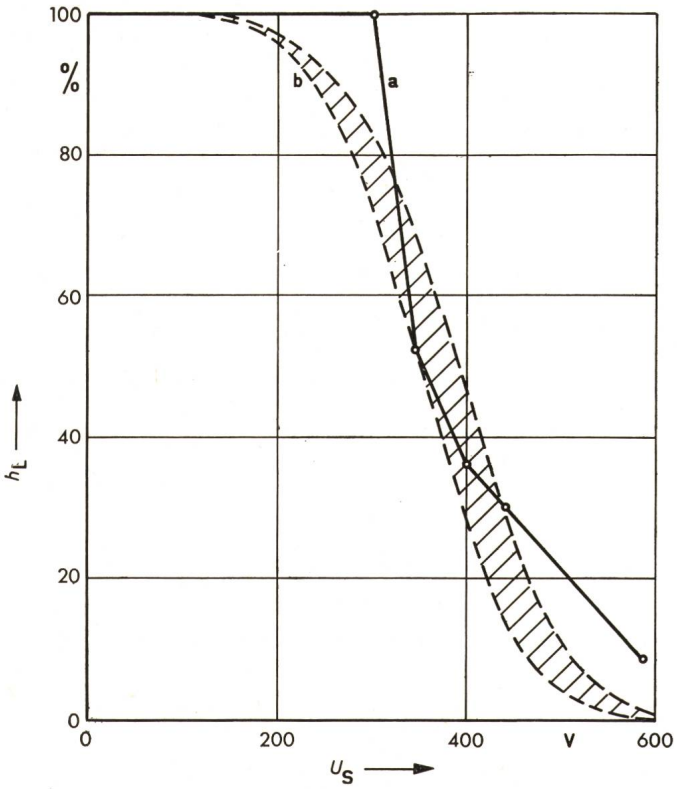

Fig. 4
Löschhäufigkeit h_L als Funktion der Wiederkehrspannung U_S
$I = 5$ kA, $f_e = 300$ kHz, Kammer entsprechend Fig. 1a mit Plexiglas-Wänden und Cu-Kontaktstücken

a gemessen
b berechnet aus Mittelwert (390 V) und Standardabweichung (90 V) unter Zugrundelegung einer Normalverteilung, Überschwingfaktor $\gamma_e' = 1{,}0...1{,}1$

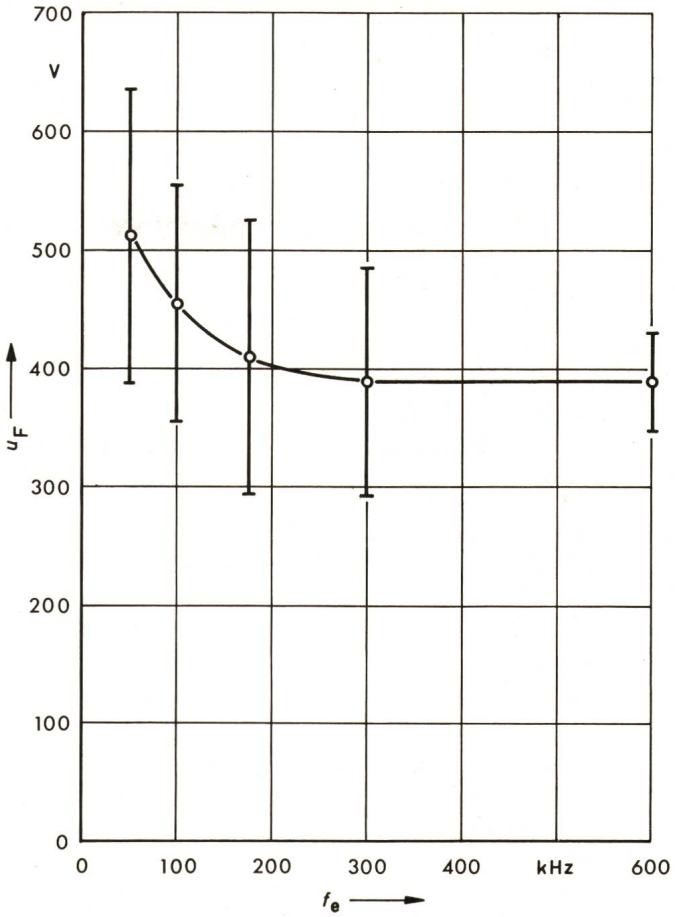

Fig. 5
Wiederverfestigungsspannung u_F in Abhängigkeit von der Frequenz f_e der unbeeinflussten Einschwingspannung
$I = 5$ kA, Kammern entsprechend Fig. 1a mit Plexiglas-Wänden und Cu-Kontaktstücken

ergebenden theoretischen Löschhäufigkeitsverlauf für $\gamma_e' = 1{,}0...1{,}1$. Die recht gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und errechneten Werten, die auch bei Löschkammern mit Glas- und Keramikwänden auftrat, lässt den Schluss zu, dass die durch den Kathodenschichtdurchschlag bestimmte Wiederverfestigungsspannung u_F im allgemeinen die Löschgrenze darstellt. Löschungen wie in Fig. 3f sind danach nicht die Regel.

Zur experimentellen Ermittlung der Wiederverfestigungsspannung wurde die Transformatorspannung so eingestellt, dass überwiegend Wiederzündungen eintraten ($\geq$ 560 V).

5. Beeinflussung der Wiederverfestigungsspannung

5.1 Einschwingfrequenz

Untersuchungen von *Schmelzle* [4] an Lichtbögen zwischen zylindrischen Kontaktstücken in Luft bei Strömen bis ca. 1,3 kA zeigten, dass oberhalb einer vom Strom und vom Kontaktwerkstoff abhängigen Grenze die Wiederverfestigungsspannung u_F von der Einschwingfrequenz unabhängig ist. Der Wert dieser Festigkeit wird als Sofortverfestigungsspannung bezeichnet. Entsprechende Versuche wurden mit Löschblechkammern entsprechend Fig. 1a mit Plexiglaswänden durchgeführt. Das Resultat ist in Fig. 5 wiedergegeben: u_F ist von 200 kHz an praktisch konstant und steigt erst zu kleineren Frequenzen hin an. Die im folgenden angeführten Untersuchungen wurden im Sofortverfestigungsbereich, bei 300 kHz, durchgeführt.

Im Gegensatz zur Frequenz der Einschwingspannung, die keinen Einfluss auf das Lichtbogenverhalten bis zum Stromnullwerden ausübt, wird durch die meisten anderen Parameter konstruktiver oder sonstiger Art die Lichtbogenunterteilung und Lichtbogenlage im Nullbereich beeinflusst. Bereits hierdurch werden sehr unterschiedliche Voraussetzungen für die Schaltstreckenfestigkeit geschaffen. Um genauere Kenntnis über die physikalischen Ursachen bestimmter Unterschiede zu erhalten, ist deswegen ein Vergleich unter möglichst gleichen Bedingungen erforderlich. Im folgenden wird daher die Wiederverfestigungsspannung u_F als Funktion der unmittelbar vor und während des Stromnullwerdens tatsächlich vorliegenden Teilbogenzahl N_T diskutiert (Fig. 6...8). Sie wurde bei jedem Einzelversuch durch Zeitdehneraufnahmen ermittelt.

5.2 Teilbogenzahl

Die Abhängigkeit der Wiederverfestigungsspannung u_F von der Teilbogenzahl N_T (Fig. 7 und 8) war bei allen Versuchsreihen prinzipiell gleich: u_F steigt mit N_T, jedoch schwächer als proportional und häufig mit degressiver Tendenz. *Taev* [9] führte eine von ihm festgestellte ähnliche Abhängigkeit von der Löschblechzahl auf eine Verringerung der effektiven Wärmeleitfähigkeit des jeder Unterbrechungsstelle zugeordneten Löschkammerteils sowie auf das Abbremsen der einzelnen Teilbögen zurück. Der schwächer als proportionale Anstieg der u_F-Messergebnisse kann jedoch auch damit erklärt werden, dass die Spannungsaufteilung auf die einzelnen Teilstrecken von dem Verhältnis der zufällig vorhandenen Durchschlagsspannungen dieser Teilstrecken abweicht. Beim Erreichen der Durchschlagsspannung der ersten Kathodenschicht liegen die Spannungen an den restlichen Strecken noch unter ihren Durchschlagswerten. Diese Feststellung wurde bereits von *Studtmann* [14] an Steuerschaltern mit Doppelunterbrechung getroffen. Unter den hier vorliegenden Verhältnissen mit kleinen Eisenblechen im kA-Bereich wird die Spannungsaufteilung mit Sicherheit nicht durch die Kapazität der Löschbleche, wie von *Slepian* unter anderen Verhältnissen angenommen wurde [8], sondern durch die Restleitfähigkeiten der Teilstrecken bestimmt, wozu sowohl die Kathodenstrecken durch Thermo- oder Thermo-Feld-Emission als auch die Säulengebiete beitragen können. Setzt man voraus, dass die Säulenteile gut leitend sind, dann lässt sich aus Abschätzungen unter Zugrundelegung vereinfachender Annahmen die Spannungsaufteilung auf die Kathodenschichten ableiten [11]:

$$\frac{U_i}{U_k} = \left(\frac{U_{di}}{U_{dk}}\right)^A \tag{3}$$

wobei $A > 1$ sowie U_{di} und U_{dk} die Durchschlagsspannungen der i-ten und k-ten Schicht sind.

Die Spannung U_{dG}, die bei Durchschlagsbeginn an der aus N_T Teilen bestehenden Gesamtstrecke anliegt und die bei Ver-

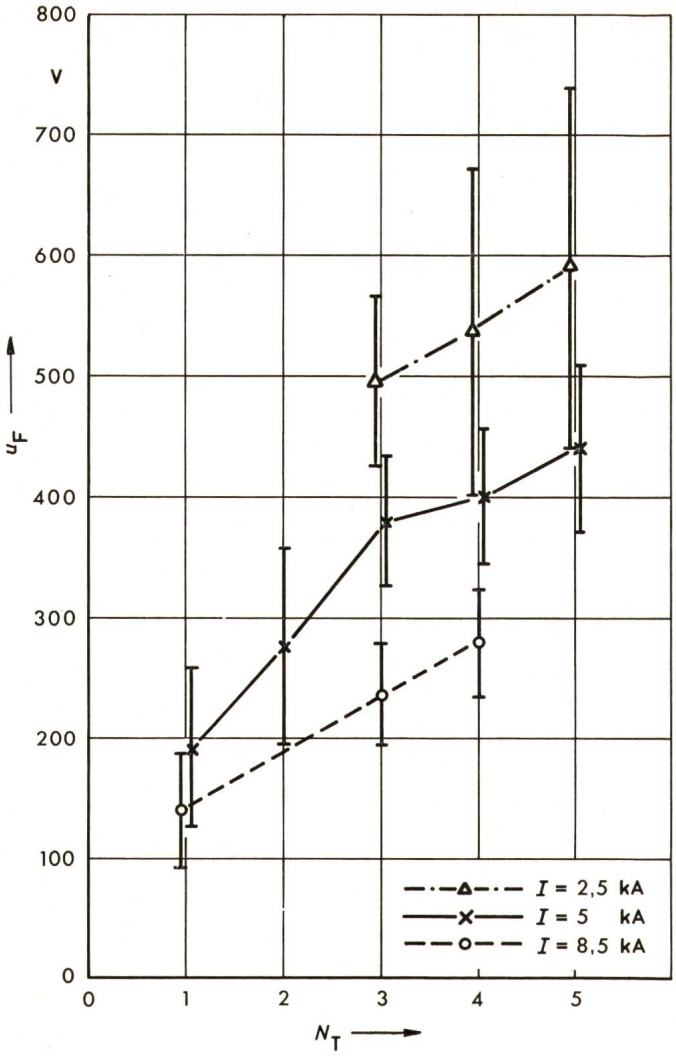

Fig. 7
Wiederverfestigungsspannung u_F (Mittelwerte mit Standardabweichung) als Funktion der Teilbogenzahl N_T bei unterschiedlichen Stromstärken
Kammer entsprechend Fig. 1a mit Plexiglas-Wänden und Cu-Kontaktstücken

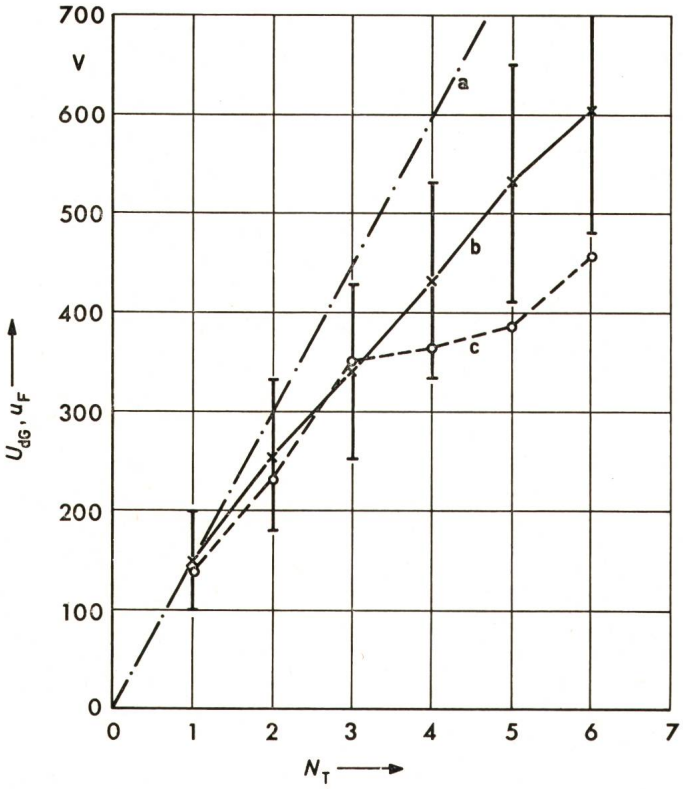

Fig. 6
Wiederverfestigungsspannung u_F bzw. theoretisch ermittelte Durchschlagspannung U_{dG} als Funktion der Teilbogenzahl N_T
a Idealfall proportionaler Zunahme
b berechnete U_{dG}-Werte (Mittelwerte mit Standardabweichung)
c gemessene u_F-Werte für verschiedene Kammern mit 16 mm Blechlänge (Mittelwerte) bei I = 5 kA

nachlässigung der Säulen der Wiederverfestigungsspannung u_F entspricht, ergibt sich zu

$$U_{dG} = U_{dmax} \sum_{i=1}^{N_T} \left(\frac{U_{di}}{U_{dmax}} \right)^A \qquad (4)$$

U_{dmax} ist die auf Grund von Zufälligkeiten vorhandene grösste Durchschlagsspannung der N_T Strecken.

Anhand eines Beispiels wurde die prinzipielle Abhängigkeit der Gesamtdurchschlagsspannung U_{dG} von der Teilbogenzahl N_T untersucht. Mit einem Rechenprogramm wurden 200 normalverteilte U_{di}-Werte (Mittelwert 150 V, Standardabweichung 50 V) simuliert, zu Gruppen von N_T Werten zusammengestellt, hiermit nach Gl. (4) U_{dG} ausgerechnet und diese wiederum zu Mittelwerten und Standardabweichungen zusammengefasst. Dabei wurde in Gl. (4) $A = 2{,}5$ gesetzt.

Fig. 6 zeigt diese Abhängigkeit (b) in einer Gegenüberstellung mit Messergebnissen (c). Deutlich tritt in beiden Fällen die vom Idealfall proportionaler Zunahme (a) abweichende Tendenz in Erscheinung.

5.3 Stromstärke, Löschblechgrösse

Die Wiederverfestigungsspannung u_F bei Kammern mit 4 Löschblechen und Plexiglaswänden ist für die untersuchten Stromstärken 2,5, 5 und 8,5 kA in Fig. 7 als Funktion der Teilbogenzahl dargestellt. Die u_F-Werte verringern sich deutlich mit der Stromstärke, so z.B. bei $N_T = 4$ von im Mittel 540 V bei 2,5 kA über 400 V bei 5 kA auf 280 V bei 8,5 kA. Diese Tendenz wurde auch bei allen anderen, hier nicht behandelten Versuchsreihen festgestellt und stimmt mit Ergebnissen anderer Autoren an freibrennenden Lichtbögen in Luft oder an grossen, offenen Löschblechsystemen [4; 9; 15] überein. Die mit zunehmender Temperatur steigende Elektronenemission aus der neuen Kathode führt zu einer Reduzierung der Kathodenschicht-Durchschlagspannung. Sie kann je Teilstrecke auf Werte weit unterhalb des Paschen-Minimums absinken, die bei Lichtbögen auf «kalten» Elektroden gemessen werden und die bei grössenordnungsmässig 300 V liegen. In [11] wird der Versuch unternommen, die Abhängigkeit dieser Spannung von der Fusspunkttemperatur abzuschätzen.

Fig. 8 zeigt die Abhängigkeit der u_F-Mittelwerte von der Löschblechlänge L_B (Definition siehe Fig. 1a) für $I = 5$ kA bei gleichbleibender Kammer- und damit Löschblechbreite. Sie nehmen bei beiden Wandmaterialien (Plexiglas bzw. Glas/Keramik) eindeutig mit der Blechlänge zu, und zwar um etwa 50% bei Verlängerung von 16 mm auf 36 mm. Auch bei höherer Stromstärke zeigte sich dieses Ergebnis. Wie die Stromstärke, so beeinflusst die Löschblechgrösse und damit die zur Bogenbewegung zur Verfügung stehende Fläche die Temperaturverhältnisse in den Fusspunktgebieten zum Zeitpunkt des Stromnulldurchgangs. Eine Erhöhung der Ausschaltstromstärke kann also durch Vergrösserung der Löschbleche unter Beibehaltung sonstiger Parameter erzielt werden. Eine Abhängigkeit vom Abstand der Löschbleche (2,5...4,5 mm) wurde nicht festgestellt.

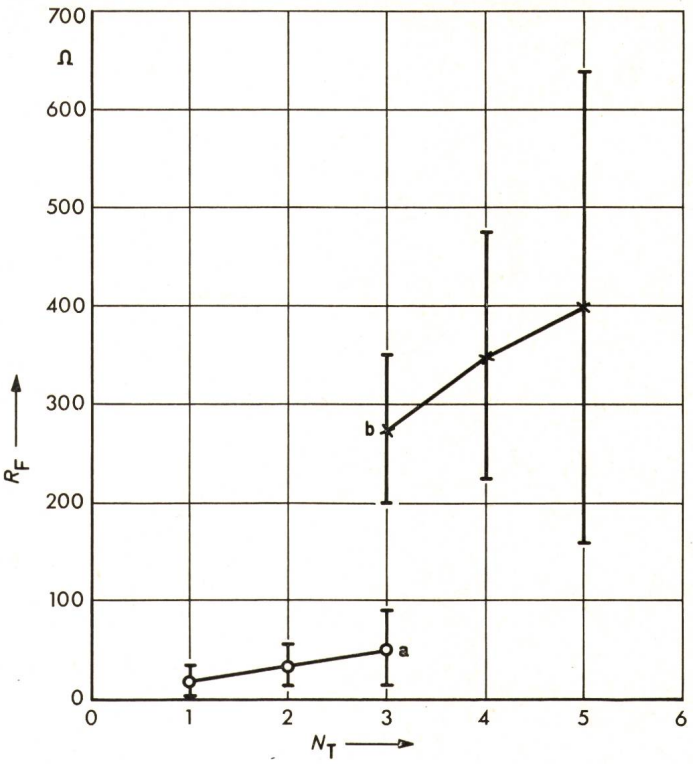

Fig. 9
Widerstand R_F bei Erreichen der Wiederverfestigungsspannung u_F als Funktion der Teilbogenzahl N_T
$I = 5$ kA, Kammern entsprechend Fig. 1a
a Kammerwände Glas/Keramik
b Kammerwände Plexiglas

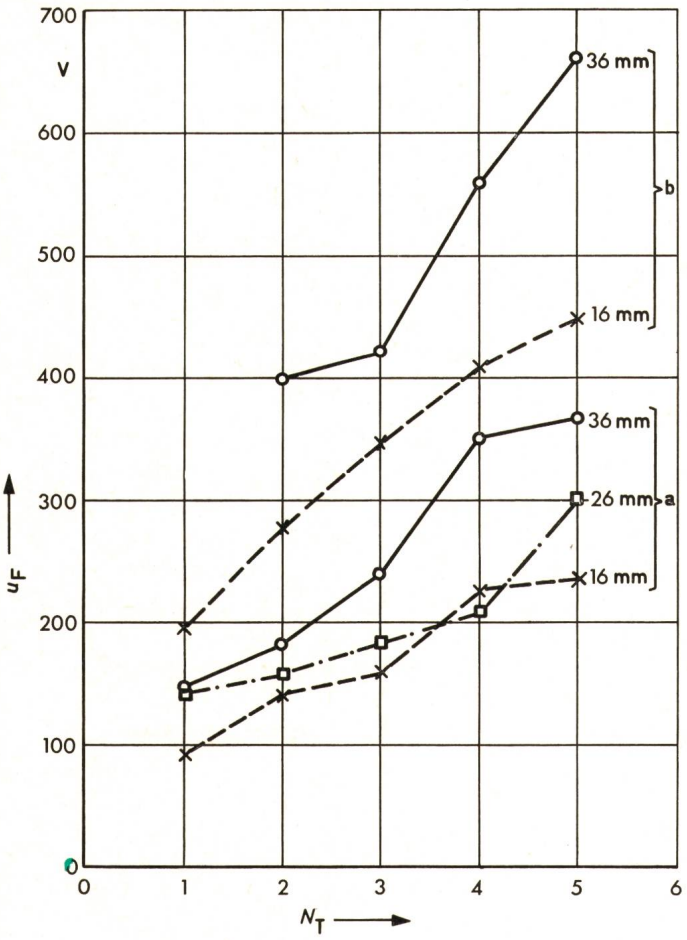

Fig. 8
Wiederverfestigungsspannung u_F (Mittelwerte) als Funktion der Teilbogenzahl N_T bei unterschiedlicher Löschblechlänge
$I = 5$ kA
a Kammerwände Glas/Keramik
b Kammerwände Plexiglas

5.4 *Kammerwandwerkstoff*

Die ermittelte Abhängigkeit der Wiederverfestigungsspannung u_F vom Werkstoff der Kammerwände geht aus Fig. 8 hervor. Bezogen auf die gleiche Teilbogenzahl, liegt sie bei gasendem Wandwerkstoff (Plexiglas) im Mittel um den Faktor 2 über den Werten für die Anordnung mit Glas/Keramik. Fig. 9 gibt für einen Löschkammertyp mit 16 mm Blechlänge nach Fig. 1a die Werte $R_F = u_F/i$ der Schaltstrecke zum Zeitpunkt unmittelbar vor dem ersten Spannungszusammenbruch wieder, die noch in weit stärkerem Masse vom Kammerwandwerkstoff abhängen. Es zeigt sich also, dass die Kühlung durch die aus dem Wandmaterial entstandenen Gase die Löschung günstig beeinflusst, zumal auch die Aufteilung in Teilbögen hierdurch verbessert wird [12].

Der Autor dankt Prof. Dr.-Ing. *Adil Erk* für die Anregung und Betreuung sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Unterstützung der Untersuchungen.

Literatur

[1] *J. Slepian:* Extinction of an a-c arc. Trans. AIEE 47(1928)4, p. 1398...1408.

[2] *W. O. Kelham:* The recovery of electric strength of an arc-discharge column following rapid interruption of the current. Proc. IEE Part II: Power Engng. 101(1954)81, p. 321...334.

[3] *J. S. Taev:* Zur Theorie der Lichtbogenlöschung bei Mehrfachunterbrechung. Elektrotechnika 37(1966)2, S. 29...32. (= Russ.)

[4] *M. Schmelzle:* Grenzen der Selbstlöschung kurzer Lichtbogenstrecken bei Wechselstrombelastung. Dissertation der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina, Braunschweig, 1968.

[5] *S. Krajinič* und *N. Idrizbegovič:* Einfluss des Löschblechwerkstoffes auf die Niederspannungs-Lichtbogenlöschung. ETZ-A 92(1971)2, S. 81...86.

[6] *J. Keitel:* Über die Löschvorgänge des Niederspannungs-Wechselstrom-Lichtbogens in Isolierstoffspaltkammern. Dissertation der Technischen Hochschule Ilmenau 1970.

[7] *O. Mayr:* Beiträge zur Theorie des statischen und des dynamischen Lichtbogens. Arch. Elektrotechn. 37(1943)12, S. 588...608.

[8] *J. Slepian:* Theory of the deion circuit breaker. Trans. AIEE 48(1929)2, p. 523...527.

[9] *J. S. Taev:* Über den Kathodenraumeffekt des Wechselstromlichtbogens. Vestnik Elektropromyshlennosti 31(1960)10, S. 48...55. (= Russ.)

[10] *O. Loh:* Vehalten des Wechselstomlichtbogens bei Niedespannungs-Schaltgeäten. ETZ-A 82(1961)23, S. 748...753.

[11] *M. Lindmayer:* Über die Vorgänge bei der Lichtbogenlöschung in kompakten Löschblechkammern bei Wechselströmen zwischen 2,5 und 8,5 kA. Dissertation der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina, Braunschweig, 1972.

[12] *M. Lindmayer:* The Influence of contact materials and chamber wall materials on the migration and the splitting of the arc in extinction chambers. Trans. IEEE PHP 9(1973)1, p. 45...49.

[13] *O. Loh* und *P. Brünig:* Zum Einschwingverhalten beim Abschalten induktiver Stromkreise. Arch. Elektrotechn. 54(1970)1, S. 25...30.

[14] *G. Studtmann:* Über die Wiederverfestigung der Lichtbogenstrecken von Steuerschaltern mit Einfach- und Doppelunterbrechung. Elektr. Ausrüstung 10(1969)5, S. 119...125.

[15] *K. Bergold:* Dynamisches Verhalten des elektrischen Niederstrombogens. ETZ-A 82(1961)6, S. 161...167.

Adresse des Autors:

Dr.-Ing. *Manfred Lindmayer,* Institut für elektrische Energieanlagen der Technischen Universität Braunschweig, Pockelsstrasse 4, D-33 Braunschweig.