

# Charakteristische Eigenschaften des Lichtbogens im Vakuum in Abhängigkeit von der Elektrodenform

Autor(en): **Amsler, J.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **65 (1974)**

Heft 16

PDF erstellt am: **08.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-915439>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Charakteristische Eigenschaften des Lichtbogens im Vakuum in Abhängigkeit von der Elektrodenform

Von J. Amsler

537.525.5 : 621.3.032.2

Zunächst werden die Merkmale der beiden Erscheinungsformen des Vakuum-Lichtbogens, des diffusen und des konzentrierten Lichtbogens kurz beschrieben. Die Bedingungen für das Auftreten dieser Bogenformen, die sich hinsichtlich Energieumsatz und Elektrodenerosion wesentlich unterscheiden, werden dargestellt. Hierauf wird die Entwicklung von Lamellenelektroden geschildert, die erlauben, die diffuse Bogenform bis zu Stromstärken von über 50 kA aufrecht zu erhalten. Zum Vergleich werden Messungen an handelsüblichen (massiven) Elektroden mitgeteilt, bei denen der Umschlag in den konzentrierten Bogen bereits bei 6 kA erfolgt.

## 1. Problemstellung

Über den Lichtbogen im Vakuum besteht eine umfangreiche Literatur, vor allem im Zusammenhang mit der Entwicklung von Vakuumschaltern [1; 2; 3]<sup>1)</sup>. Der meist kurze Vakuumbogen (ca. 1 cm) wird naturgemäss weitgehend von den Vorgängen an den Elektroden, vor allem an der Kathode, bestimmt. Diese Vorgänge hängen nicht nur von den physikalischen Eigenschaften des Elektrodenmaterials ab, sie werden vielmehr, wie aus den hier mitgeteilten Forschungsergebnissen hervorgeht, auch durch die Form der Elektroden entscheidend beeinflusst. Der Mechanismus des Stromübergangs zwischen Kathode und Plasma ist allerdings noch nicht in allen Einzelheiten bekannt [4]. Es steht jedoch fest, dass im wesentlichen zwei Formen des Vakuumbogens unterschieden werden müssen. Es sind dies der «diffuse Bogen» (nonthermionic, cold cathode arc) und der «konzentrierte Bogen» (thermionic, hot cathode arc), die sich hinsichtlich Energieumsatz und Elektrodenerosion wesentlich unterscheiden (Fig. 1 und 2). Bei den gebräuchlichen, massiven Elektroden tritt bis zu etwa 6 kA die diffuse Form des Lichtbogens auf. Bei Überschreiten dieser Stromstärke tritt schlagartig der konzentrierte Bogen in Erscheinung. Dies macht sich durch einen sprunghaften Anstieg und durch ein heftiges Unruhigwerden der Lichtbogen-spannung bemerkbar (Fig. 3). Das Auftreten dieser Lichtbogenform ist unerwünscht, da die Lebensdauer der Elektroden infolge der stärkeren Erosion verkürzt wird. Ferner werden dadurch auch die Löscheigenschaften des Vakuumschalters beeinträchtigt. Es stellt sich daher die Frage, ob das Auftreten des konzentrierten Lichtbogens nicht durch gezielte Massnahmen verhindert werden könnte. Energieumsatz und Elektrodenerosion müssten dann etwa den in Fig. 1 und 2 gestrichelt eingezeichneten Verlauf nehmen. Bevor jedoch diese Frage beantwortet werden kann, muss der Mechanismus des Stromübergangs im Vakuum etwas näher betrachtet werden.

## 2. Über den Mechanismus des Stromübergangs im Vakuum

Im folgenden seien die Verhältnisse kurz geschildert, wie sie sich aus der einschlägigen Literatur [4] sowie auf Grund eigener Beobachtungen ergeben. Die Zündung des Lichtbogens erfolgt (abgesehen vom Vakuumdurchschlag des offenen Kontakts bei sehr hohen Spannungen) durch Kontakttrennung unter Stromfluss. Die dabei auftretenden Erscheinungen wie

On décrit brièvement les particularités des deux formes que revêt un arc dans le vide: la forme diffuse et la forme concentrée. Puis on indique les conditions d'apparition de ces formes d'arc, qui diffèrent nettement en ce qui concerne l'énergie en jeu et l'érosion des électrodes. L'auteur décrit ensuite le développement des électrodes à lames, électrodes qui permettent de maintenir un arc diffus jusqu'à des intensités de plus de 50 kA. A titre de comparaison, l'auteur mentionne des mesures faites avec des électrodes ordinaires (massives), pour lesquelles la forme d'arc concentrée intervient déjà à 6 kA.

Schweissen und Brückenbildung sind Gegenstand besonderer Untersuchungen, die hier nicht besprochen werden sollen [5; 6]. Es wird vielmehr vorausgesetzt, dass bereits ein Strom von mindestens 50 A bis zu etwa 1 kA fliesst. Unter diesen Umständen ergibt sich ein diffuser Lichtbogen mit einer Ladungsverteilung und einem Spannungsverlauf, wie dies etwa in Fig. 4 dargestellt ist. Die Bildung von Ladungsträgern (Ionen und Elektronen) spielt sich hier in einem ausserordentlich dünnen, flächenmässig jedoch ausgedehnten Bereich in unmittelbarer Nähe der Kathodenoberfläche ab. Dies geht schon daraus hervor, dass praktisch der gesamte Spannungsabfall (der sog. Kathodenfall) auf dieses Gebiet beschränkt ist. Die Kathode bleibt relativ kalt. Die mittlere Temperatur bleibt unterhalb des Schmelzpunktes des Elektrodenmaterials. Trotz-

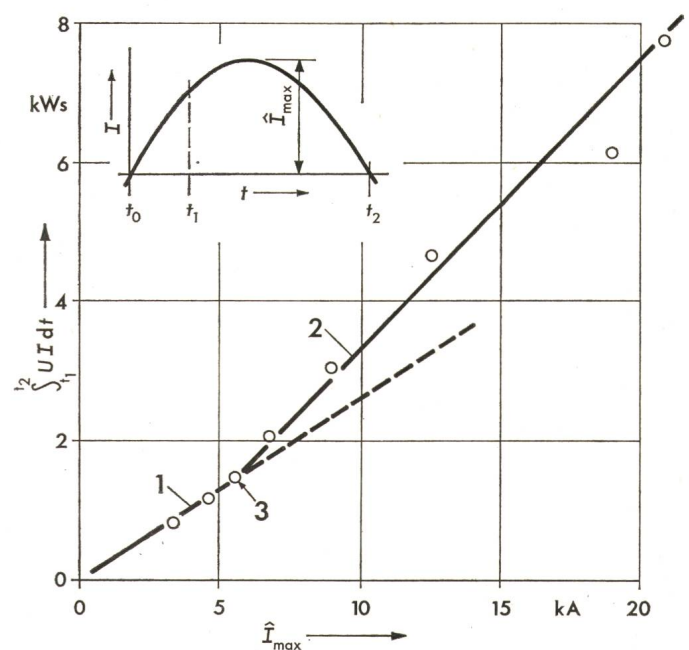


Fig. 1 Schaltenergie in Funktion des Stromsichelwertes bei massiven Elektroden nach Fig. 10

Art der Beanspruchung siehe Figur links oben

- 1 diffuser Bogen
- 2 konzentrierter Bogen
- 3 Einsetzen der erhöhten Spannung

$t_0, t$ : Stromnulldurchgänge

$t_1$ : Kontakttrennung

$U$ : Lichtbogen-spannung

$I$ : Stromstärke

$t$ : Zeit

$\hat{I}_{max}$ : Scheitelwert der Stromstärke

<sup>1)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.



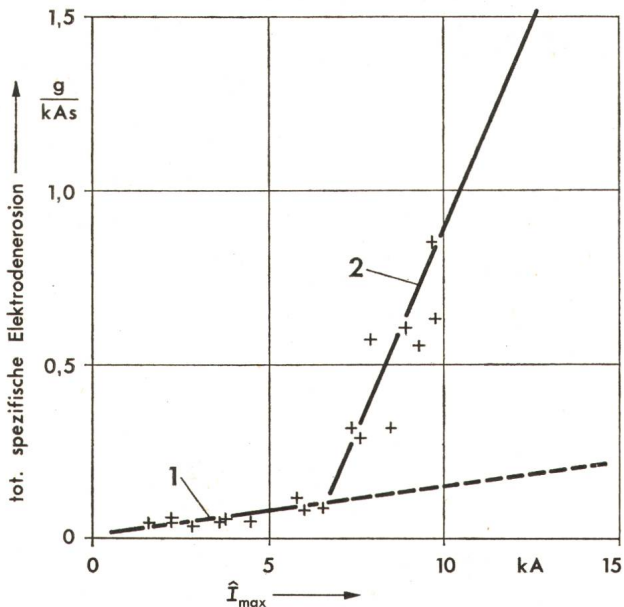


Fig. 2 Spezifische Elektrodenerosion massiver Kupferelektroden in Funktion des Stromsicherheitwertes  $\hat{I}_{max}$

1 diffuser Lichtbogen  
2 konzentrierter Lichtbogen  
Nach Messungen von Althoff [7]

dem tritt eine gewisse Erosion auf. Dies muss in erster Linie dem intensiven «Ionenbeschuss» durch die energiereichen, ionisierten Metallatome zurückgeführt werden, die beim Aufprall auf die Kathode nicht nur Elektronen, sondern auch neutrale Metallatome «herausschlagen». Die Kathode sieht daher nach Stromdurchgang aus wie «sandgestrahlt» und nicht glänzend wie bei einem Schmelzvorgang. Der hier geschilderte Mechanismus der Befreiung von Elektroden aus der Kathodenoberfläche, der für die Aufrechterhaltung des Stromtransportes notwendig ist, ist nicht sehr ergiebig. Er beansprucht daher relativ grosse Kathodengebiete.

Die aus der Kathode befreiten Elektronen erhalten im Kathodenfall eine grosse Geschwindigkeit und fliegen, nachdem sie einen Teil ihrer Energie an die Ionen abgegeben haben, praktisch unbehindert zur Anode. Der Dampfdruck des durch Erosion gebildeten Metaldampfes ist so klein, dass praktisch keine Zusammenstösse neutraler Metallatome und Elektronen stattfinden. Im Zwischengebiet tritt daher kein Spannungsabfall auf.

Da sich im Zwischengebiet neben den neutralen Atomen vorwiegend negative Ladungen befinden (vgl. Fig. 4), treten abstossende Kräfte auf. Da sich aber andererseits die Ladungen alle parallel in Richtung Anode bewegen, sind auch anziehende magnetische Kräfte wirksam (Pincheffekt), welche den abstossenden Kräften das Gleichgewicht halten. Der Gleichgewichtsradius ist relativ gross und kann bei Stromstärken über 1 kA etwa mit dem Durchmesser der Kathode verglichen werden.

Wird nun die Stromstärke gesteigert, dann muss auch die mittlere Stromdichte auf der Kathodenoberfläche ansteigen, da die zur Verfügung stehende Fläche bereits vollständig belegt ist. Dies hat ein Ansteigen des Kathodenfalls und damit auch der Erosion zur Folge. Damit steigt aber auch der Druck des Metaldampfes und die Wahrscheinlichkeit von Zusammenstösse zwischen neutralen Metallatomen und Elektronen wird grösser. Diese zum Teil ionisierenden Stösse behindern den

freien Flug der Elektronen, so dass auch im Zwischengebiet ein Spannungsabfall auftritt. Die durch Zusammenstösse gebildeten Metallionen bewegen sich, verglichen mit den Elektronen, nur sehr langsam. Die negative Raumladung wird

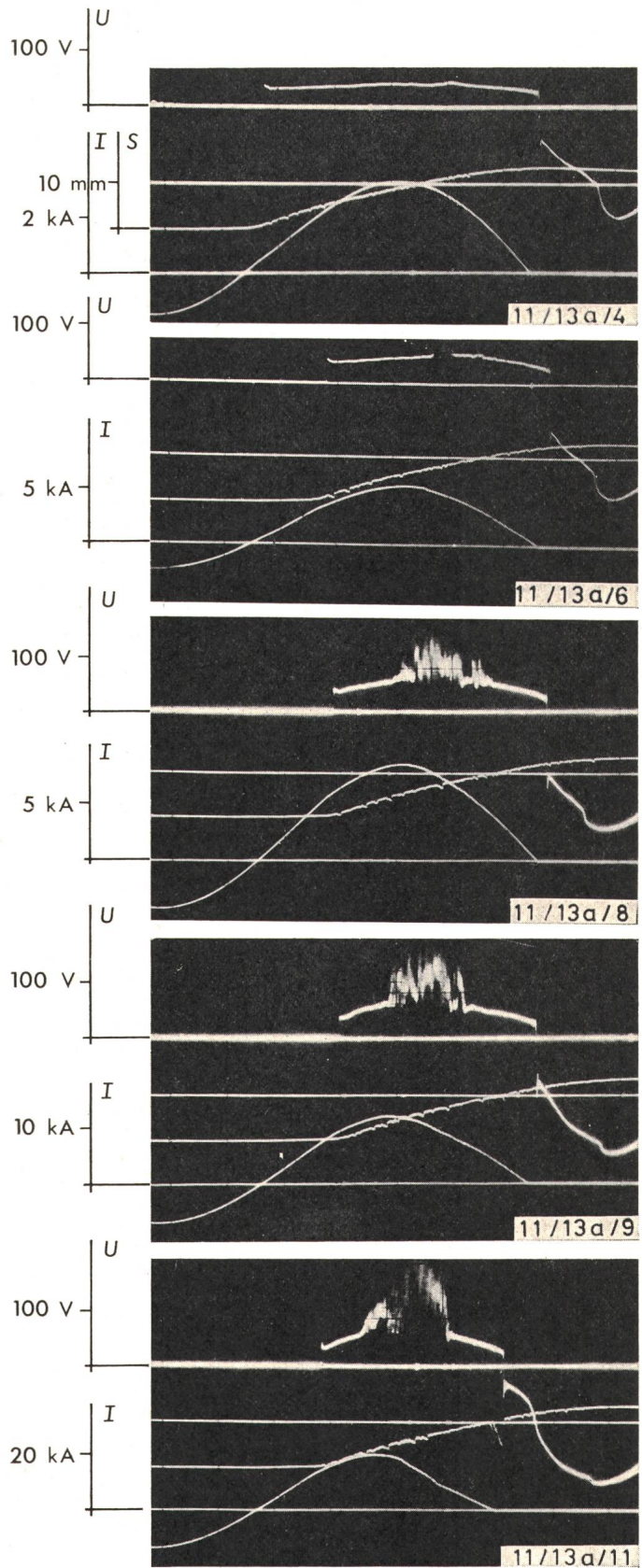


Fig. 3 Oszillogramme des Strom- und Spannungsverlaufs bei massiven Vakuumelektroden nach Fig. 10

U Lichtbogenspannung  
I Stromstärke  
S Kontaktweg



daher durch diese Ionen weitgehend kompensiert. Andererseits werden aber die mit dem Quadrat der Stromstärke anwachsenden magnetischen Kräfte rasch grösser. Die Entladung zieht sich daher immer mehr zu einer Säule zusammen (Fig. 5) und es kommt zur Ausbildung des konzentrierten Bogens. Innerhalb der Säule können ganz erhebliche Drücke auftreten, die sich nach folgender Formel berechnen:

$$p = \frac{\mu_0 I^2}{2 \pi^2 d^2}$$

worin

$$\mu_0 \text{ Permeabilität des Vakuums} = 4 \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$$

$I$  Stromstärke in A

$d$  Durchmesser der Säule in m

$p$  Druck in  $\text{N/m}^2$

Für  $I = 20 \text{ kA}$  und  $d = 1 \text{ cm}$  ergeben sich so bereits Drücke von  $2,5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$  ( $\approx 2,5 \text{ ata}$ ).

An den Berührungsstellen der Säule mit den Elektroden wird das Metall infolge der grossen Energiekonzentration aufgeheizt. Damit setzt der wesentlich ergiebiger Prozess der Thermoemission von Elektronen ein, wodurch der Konzentrationsprozess noch unterstützt wird. Das Metall beginnt an diesen Stellen zu schmelzen und schliesslich heftig zu sieden. Dies hat ein weiteres sprunghaftes Ansteigen des Dampfdruckes zur Folge. Sobald dieser Punkt in der Entwicklung des konzentrierten Bogens erreicht ist, steigt, wie entsprechende Versuche gezeigt haben, auch die Lichtbogenspannung sprunghaft an (vgl. Fig. 3). Die damit verbundene Leistungssteigerung sowie der bereits erwähnte Verdampfungsprozess erklären die Zunahme der Schaltenergie und der Erosionsrate (vgl. Fig. 1 und 2).

Da das Aufheizen und Abkühlen der «Fusspunkte» thermodynamische Vorgänge sind, die relativ träge verlaufen, sind hysteresenähnliche Vorgänge zu erwarten. Tatsächlich erscheint das Gebiet der erhöhten Spannung, wie Fig. 3 zeigt, gegenüber dem Strommaximum verschoben und zwar um so mehr, je höher das Strommaximum ist.

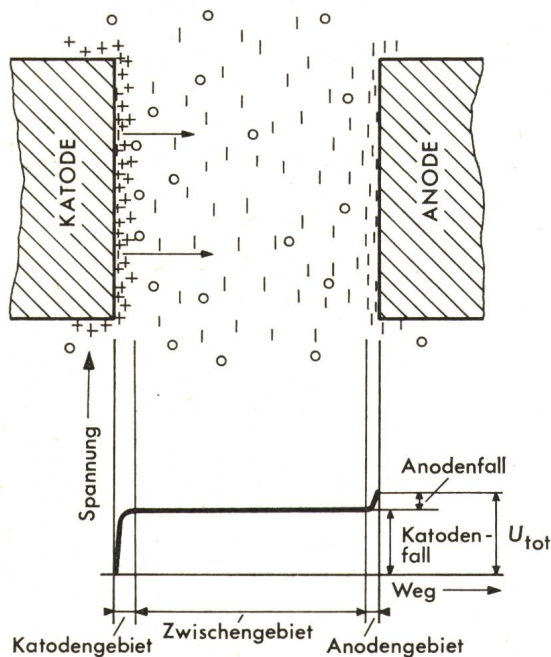


Fig. 4 Ladungsverteilung und Spannungsverlauf bei diffusem Vakuum-Lichtbogen

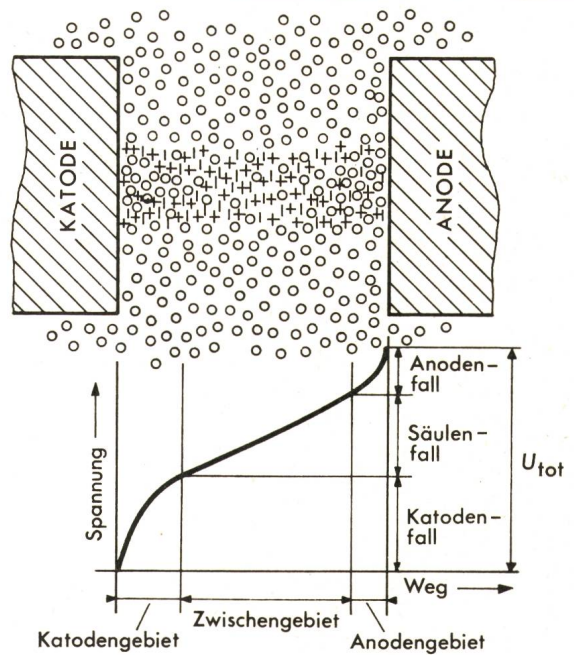


Fig. 5 Ladungsverteilung und Spannungsverlauf bei konzentriertem Vakuum-Lichtbogen

Wie aus den vorstehenden Ausführungen hervorgeht, ist das Auftreten des konzentrierten Lichtbogens an folgende Bedingungen gebunden, die der Reihe nach erfüllt sein müssen:

- Die zur Verfügung stehende Kathodenoberfläche genügt nicht mehr, um durch «kalte Elektronenemission» genügend Ladungsträger zur Aufrechterhaltung des Stromes zur Verfügung zu stellen.
- Der Druck des Metallampfes im Gebiet zwischen den Elektroden übersteigt einen gewissen kritischen Wert.
- Durch die Energiekonzentration bilden sich hochoberhitze Fusspunkte, die die thermische Emission von Elektronen ermöglichen.

Bei der Lösung der Aufgabe, das Auftreten des konzentrierten Bogens zu verhindern, muss daher danach getrachtet werden, das Eintreten der oben genannten Bedingungen durch geeignete Massnahmen so lange wie möglich hinauszuzögern. Im folgenden Abschnitt seien aus der grossen Zahl von Versuchen, die zu diesem Zwecke unternommen wurden, drei mit I, II und III bezeichnete Elektrodenvarianten, die typische Entwicklungsstufen darstellen, näher beschrieben und die damit erreichten Versuchsergebnisse mitgeteilt.

### 3. Versuchsordnung und Versuchsergebnisse

Die Versuche wurden an einem Niederspannungs-Hochstrom-Transformator ( $U_N = 110 \text{ V}$ ,  $I_K = 100 \text{ kA}$ ) durchgeführt, der direkt aus dem 8-kV-Netz des städtischen Werkes gespeist wird. Variiert wurde der Scheitelwert der Stromhalbwellen. Die Versuchsobjekte wurden jeweils noch bei geschlossenem Kontakt mit vier aufeinanderfolgenden Stromhalbwellen belastet, wobei in der letzten Stromhalbwelle die Kontakttrennung erfolgte. Der Moment der Kontakttrennung wurde auf  $45^\circ$  nach dem Nulldurchgang synchronisiert, da nach Althoff [7] dann die grösste Erosionsrate resultiert (vgl. Fig. 1). Registriert wurde neben der Stromstärke auch die Spannung, speziell der Verlauf der Lichtbogenspannung, sowie der Weg des beweglichen Kontaktes bei der Kontakttrennung.



Die Versuchsobjekte wurden in einer Vakuumkammer montiert, wobei die Kammer darauf während mindestens 24 h bei 200 °C unter ständigem Pumpen ausgeheizt wurde. Der Enddruck betrug jeweils weniger als  $10^{-6}$  Torr.

#### 4. Elektrodenvariante I

Diese Variante ist in Fig. 6 etwas schematisiert dargestellt. Zur Vergrößerung der wirksamen Oberfläche wurde die Elektrode «lamelliert». Die einzelnen Lamellen bestehen aus dünnem hochkant gestelltem Blech. Eine grosse Zahl solcher Lamellen sind in engem Abstand parallel zueinander angeordnet und in dieser Stellung fixiert. Zwei solcher identischer Elektroden bilden zusammen den Vakuumkontakt.

Die bei der Kontakttrennung sich bildende Plasmawolke ist schraffiert dargestellt. Das Plasma dringt etwa 0,5 cm tief zwischen die Lamellen hinein, bevor es so weit abgekühlt ist, dass es seine Leitfähigkeit verliert. Ein erheblicher Teil der Seitenflächen der Lamellen kann so am Stromübergang teilnehmen. Die wirksame Elektrodenfläche kann auf diese Weise gegenüber massiven Elektroden etwa verzehnfacht werden. Die Anordnung hat gleichzeitig den Vorteil, dass der durch Elektrodenerosion gebildete Metalldampf sich nicht nur seitlich durch den Elektrodenspalt, sondern auch zwischen den Lamellen hindurch, also praktisch in allen Richtungen, ausbreiten kann. Der Dampfdruck kann so wesentlich niedriger gehalten werden als bei massiven Elektroden. Mit dieser einfachen Anordnung ist es bereits gelungen, die Stromstärke, bei welcher der Umschlag in die konzentrierte Lichtbogenform erfolgt, von 5 auf etwa 20 kA zu erhöhen. Bei den Versuchen zeigte sich, dass die Lamellen bei höheren Stromstärken im Zentrum der Entladung Schmelzspuren aufwiesen (beginnende Fusspunktbildung). Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei diesen für den Lichtbogen «offenen» Elektroden sich an Stelle des im vorigen Abschnitt geschilderten Druckaufbaus eine axiale Plasmaströmung auszubilden beginnt. Das Plasma wird durch den Pincheffekt sozusagen aus dem Kanal in beiden

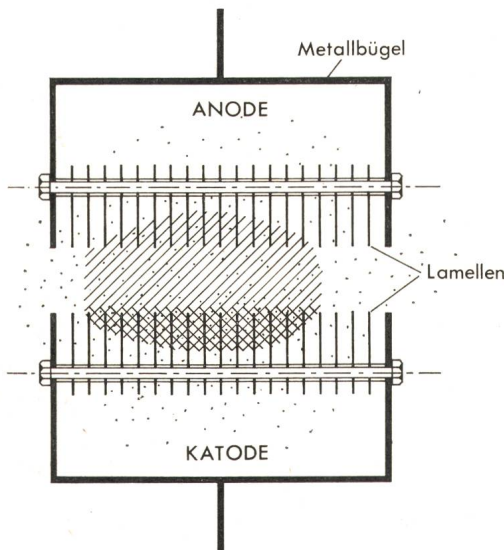


Fig. 6 Schematische Darstellung einer Lamellenelektrode Variante I

- vorwiegend positive Ladungen
- vorwiegend negative Ladungen
- sich ausdehnender neutraler Metalldampf

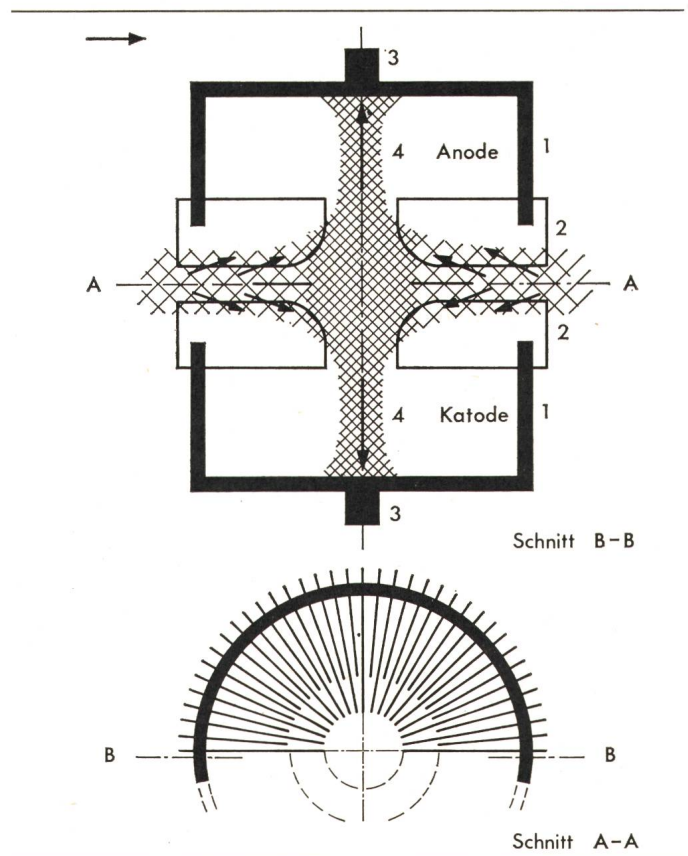


Fig. 7 Schematische Darstellung einer Lamellenelektrode

Variante II

1 Kupferrohr

2 Lamellen

3 Anschlüsse

4 Plasmastrahlen

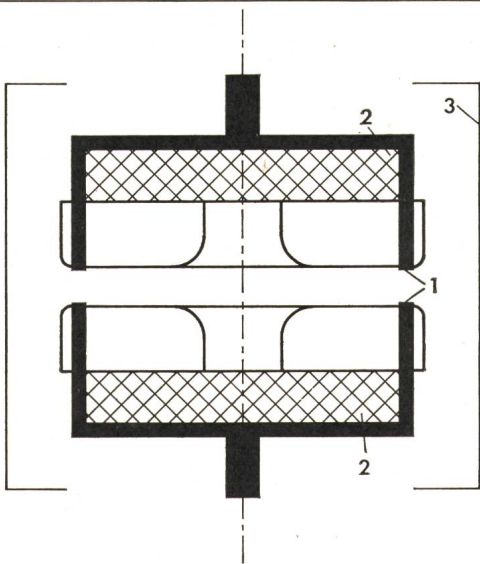
→ Bewegungsrichtung des Plasmas

Achsenrichtungen «hinausgequetscht». Dieser Plasmaverlust muss ersetzt werden. Dies geschieht durch Aufheizung und Ionisierung von seitlich zuströmendem neutralen Metalldampf. Solche Plasmaströmungen (Jets) sind in der Literatur, wenn auch in anderem Zusammenhang, schon oft beschrieben worden, erstmals wohl von Maecker [8]. Die Lamellenpartien, die direkt von diesen Plasmastrahlen bestrichen werden, sind der grossen thermischen Belastung nicht gewachsen, sondern schmelzen und verdampfen, was zur unerwünschten Druckerhöhung führt.

#### 5. Elektrodenvariante II

Auf Grund der oben geschilderten Erfahrungen wurde eine weitere Variante entwickelt, wie sie in Fig. 7 halbschematisch dargestellt ist. Ein massives zylindrisches Rohr dient als Träger von radial angeordneten Lamellen. Diese Lamellen lassen im Bereich der Rohrachse ein «Loch» frei. Bei der Kontakttrennung entstehen an den Berührungspunkten eine Reihe von Schaltlichtbögen, die sich mit steigender Stromstärke ausbreiten, so dass sich ein über die Elektrodenfläche ausgedehnter diffuser Bogen ergibt. Unter der Einwirkung der eigenmagnetischen Kräfte bilden sich schliesslich im Gebiet der Rohrachse die beschriebenen Plasmastrahlen aus. Das magnetische Eigenfeld übt bei dieser Anordnung somit eine stabilisierende Wirkung auf den Lichtbogen aus, so dass dieser immer in das Zentrum der Elektrode geführt wird. Trotzdem nehmen, wie fotografische Aufnahmen gezeigt haben, auch die äusseren

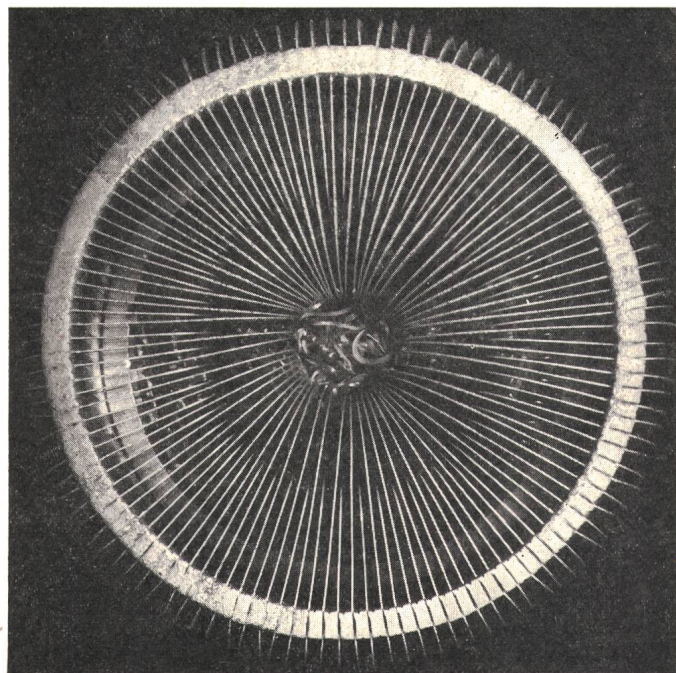




**Fig. 8 Schematische Darstellung einer Lamellenelektrode Variante III**  
 1 Stromübergang bei geschlossenem Kontakt  
 2 Kondensator (Kupferspäne)  
 3 Schutzschild

Elektrodenpartien an der Stromleitung teil. Die Plasmastrahlen können nun ohne auf die Lamellen aufzutreffen, durch die zentralen Löcher austreten und in den Hohlraum hinter den Lamellen gelangen. Die Existenz dieser Plasmastrahlen kann noch in einer Distanz von 8 cm hinter der Kontaktebene durch engbegrenzte Verfärbung quergestellter dünner Metallfolien nachgewiesen werden.

Mit solchen rotationssymmetrischen Elektroden gelingt es, die Stromstärke für den Umschlag in den konzentrierten Bogen auf etwa das Zehnfache des bei handelsüblichen Elektroden



**Fig. 9 Ansicht der Lamellenelektrode nach Variante III (Kathode) nach Durchführung der Versuche mit 27 Schaltungen und einer totalen durchgeflossenen Ladung von 1,7 kAs**

$$\left( \sum \int_{t_1}^{t_2} I dt \right)$$

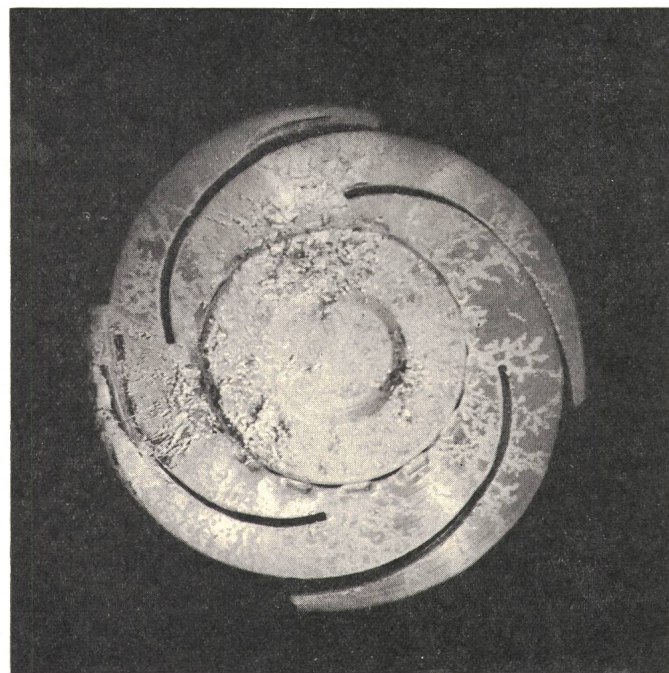
gemessenen Wertes zu steigern. Ein Nachteil dieser Anordnung besteht andererseits darin, dass die Lamellen höhere Stromstärken im geschlossenen Zustand nicht dauernd führen können. Es wurde ferner beobachtet, dass ein Teil des durch die Plasmastrahlen in den Hohlraum hinter den Lamellen geführten Plasmas nach Rekombination zwischen den Lamellen hindurch wieder austreten und so zwischen die Elektroden gelangen kann. Es wurde daher eine weitere Variante entwickelt, bei der bereits die technische Anwendung im Vakuumschalter im Vordergrund steht.

### 6. Elektrodenvariante III

Die Elektrode (Fig. 8) besteht wie in Variante II aus einem Kupferrohr, das wiederum als Träger für die konzentrisch angeordneten Lamellen dient. Dieses Rohr, das aus extrem gasfreiem Kupfer gefertigt ist, steht im Gegensatz zu der in Fig. 7 gezeigten Variante etwas über die Lamellen vor, so dass es im geschlossenen Zustand des Kontaktes den Stromübergang vermitteln kann. Der Hohlraum hinter den Lamellen ist mit Spänen aus gasfreiem Kupfer ausgefüllt, das dank seiner grossen Oberfläche als Kondensator für den von den Plasmastrahlen transportierten Metalldampf dienen kann.

Die Lamellen bestehen aus dünnem Blech, dessen Gasgehalt durch mehrstündiges Glühen unter Vakuum zum grössten Teil eliminiert wurde.

Fig. 9 zeigt eine der Elektroden (Kathode) nach Durchführung von 27 Schaltungen mit einer totalen durchgeflossenen Ladungsmenge von 1,7 kAs. Zum Vergleich ist in Fig. 10 eine massive Elektrode (Kathode) nach Durchführung von 11 Schaltungen mit einer Ladungsmenge von 0,5 kAs wiedergegeben. Die Erosion der Lamellenelektrode (Anode und Kathode zusammen) liegt an der Grenze der Messgenauigkeit von etwa 0,05 g. Das erodierte Material findet sich praktisch



**Fig. 10 Ansicht einer massiven Elektrode (Kathode) nach den Versuchen mit 11 Schaltungen und einer totalen durchgeflossenen Ladung von 0,5 kAs**



restlos auf den Kupferspänen, die als Kondensator dienen. Auf dem Schutzschild findet sich nur eine Andeutung eines Niederschlages von erodiertem Material. Die Erosionsrate beträgt unter gleichen Bedingungen weniger als 2 % der Erosionsrate von massiven Cu-Elektroden.

Fig. 11 zeigt eine Auswahl von Oszillogrammen mit verschiedenen Stromsichelwerten bis zum höchsten in der verwendeten Anlage einstellbaren Wert von 64 kA. Wie die Oszillogramme zeigen, verläuft die Lichtbogenspannung bis zur höchsten Stromstärke völlig glatt, so dass angenommen werden darf, dass der Lichtbogen hier ohne Fusspunkte, also diffus brennt.

In Fig. 12 sind die gemessenen Sichelwerte der Lichtbogenspannung in Funktion des Stromsichelwertes für die Lamellenelektroden nach Variante III und zum Vergleich auch für die massiven Elektroden wiedergegeben.

Fig. 13 gibt die Schaltenergie in Funktion des Stromsichelwertes für die Lamellenelektroden sowie für die massiven Elektroden an. Bei 20 kA ist die Schaltenergie der Lamellenelektroden etwas weniger als die Hälfte derjenigen der massiven Elektroden. Die Erosionsrate ist aber etwa 50mal kleiner. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die Energie bei der Lamellenelektrode auf eine wesentlich grössere Elektrodenfläche verteilt, so dass die spezifische Belastung ausserordentlich gering ist.

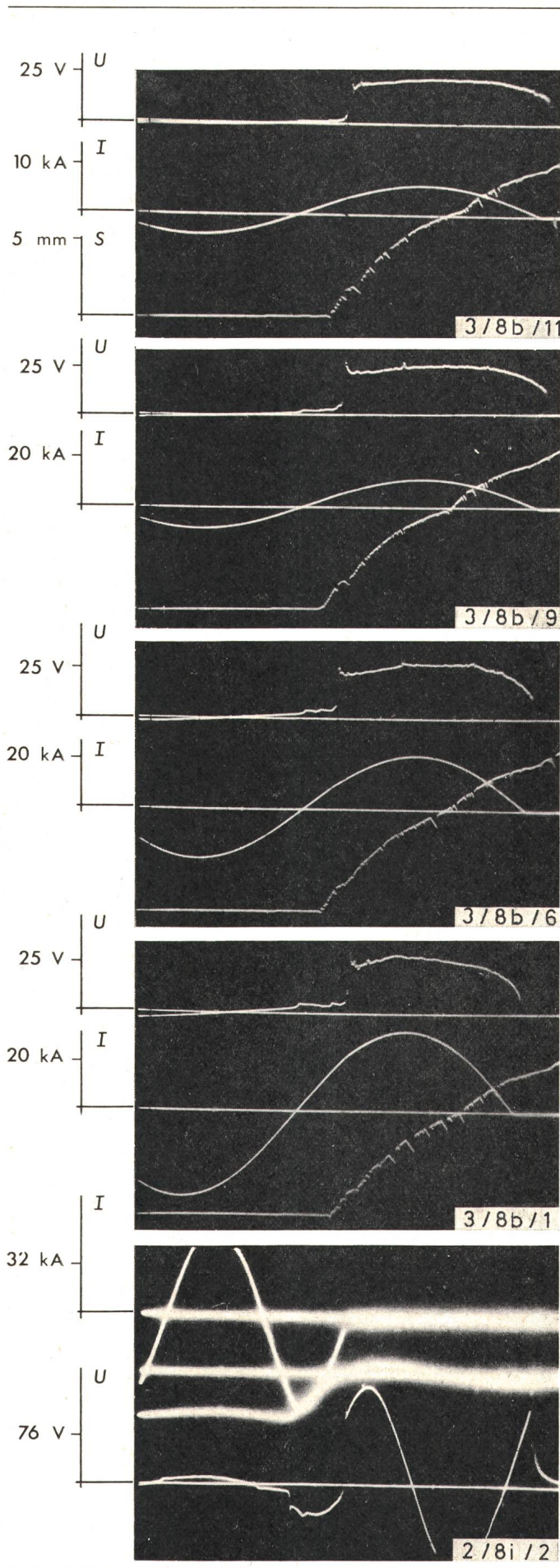


Fig. 11 Oszillogramme des Strom- und Spannungsverlaufes bei Lamellenelektroden nach Variante III

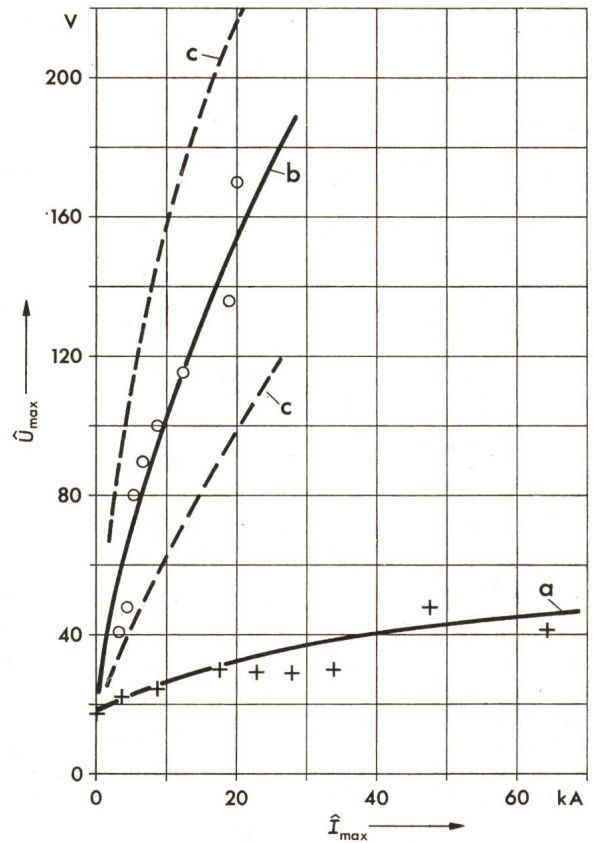


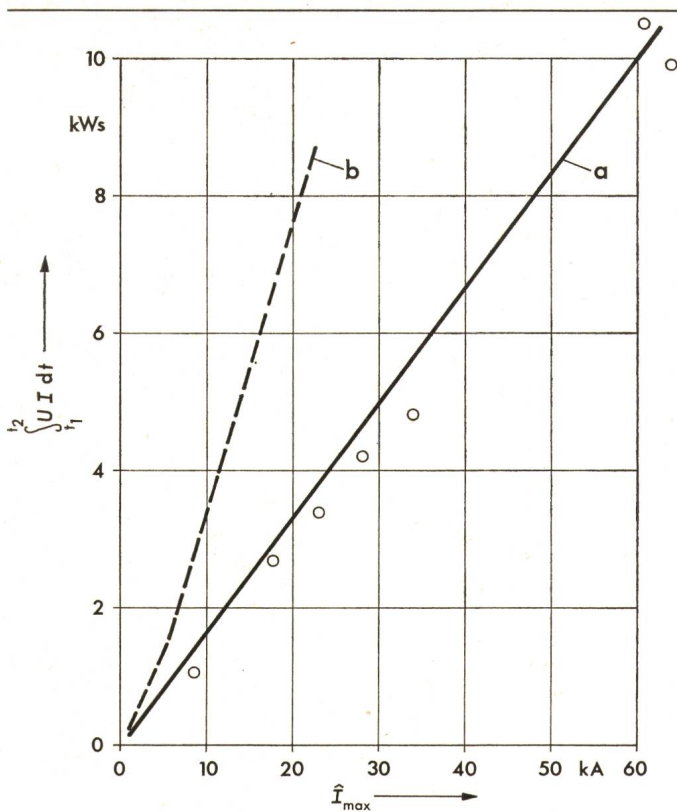
Fig. 12 Sichelwert der Lichtbogenspannung von Lamellenelektroden nach Variante III im Vergleich zu massiven Kupferelektroden in Funktion des Sichelwertes der Stromstärke

Beanspruchung der Elektroden wie in Fig. 1

- a Lamellenelektrode (vgl. Fig. 9)
- b massive Cu-Elektrode (vgl. Fig. 10)
- c Amplitude der hochfrequenten Schwingung

$\hat{I}_{max}$  Stromsichelwert  
 $\hat{U}_{max}$  Sichelwert der Lichtbogenspannung





**Fig. 13** Schaltenergie von Lamellenelektroden in Funktion des Stromscheitelwertes

- a Fe-Lamellenelektrode (vgl. Fig. 9)
- b massive Cu-Elektrode (vgl. Fig. 10)

$\hat{I}_{max}$  Stromscheitelwert

$\int_{t_1}^{t_2} UI dt$  Schaltenergie

### 7. Zusammenfassung

Die Bedingungen für das Auftreten der diffusen und der konzentrierten Form des Vakuum-Lichtbogens wurden untersucht. Es wurde gezeigt, dass die diffuse Form des Bogens durch geeignete Massnahmen bis zu Stromstärken von über 50 kA aufrechterhalten werden kann, währenddem bei massi-

ven Elektroden der Umschlag in die konzentrierte Bogenform bereits bei ca. 6 kA erfolgt. Diese Massnahmen sind im wesentlichen folgende:

- Vergrösserung der wirksamen Elektrodenfläche durch Lamellierung.
- Magnetische Stabilisierung und Verhinderung der Fusspunkt-bildung durch radialkonzentrische Anordnung der Lamellen.

Durch diese Massnahmen kann die umgesetzte Energie (Schaltenergie) bei Stromscheitelwerten von 20 bis 30 kA auf ca. 50 % und die Elektrodenerosion auf ca. 2 % der bei massiven Elektroden gemessenen Werte beschränkt werden.

Das hier vorgeschlagene Kontaktsystem stellt noch keineswegs ein Optimum dar, sondern ist in verschiedenen Richtungen, besonders im Hinblick auf eine weitere Steigerung der Stromstärke, noch entwicklungsfähig.

Der Autor dankt Dr. *Adrian W. Roth* welcher den grundlegenden Arbeiten auf dem Gebiet des Niederdruck-Hochstrombogens mit Anregungen und Interesse zur Seite gestanden hat, und den Mitarbeitern in seiner Firma. Ebenso danken möchte er Prof. Dr. *H. Schneider* von der Universität Fribourg für viele klärende Diskussionen.

### Literatur

- [1] G. R. Mitchell: High-current vacuum arcs. Part 1 and part 2. Proc IEE 117(1970)12, 2315...2332.
- [2] M. P. Reece: The vacuum switch. Part 1: Properties of the vacuum arc. Proc IEE 110(1963)4, p. 793...802.
- [3] F. D. Althoff: Forschungsarbeiten auf dem Gebiet elektrischer Vakuumschalter für grosse Ströme. ETZ-A 92(1971)9, S. 538...543.
- [4] A. E. Guile: Arc-electrode phenomena. Proc. IEE, IEE Reviews 118 (1971)9R, p. 1131...1154.
- [5] P. G. Stade and M. D. Nahemow: Initial separation of electrical contacts carrying high currents. J. Applied Physics 42(1971)9, p. 3290...3297.
- [6] S. M. Celikatova and I. A. Lukatskaya: Initial stage of vacuum interrupting arc. Proceedings of the IEE International Conference on Gas Discharges. IEE Conference Publication 70(1970), p. 370...374.
- [7] F. D. Althoff: Über die Elektrodenerosion beim Schalten grosser Wechselströme im Hochvakuum. Dissertation der Technischen Hochschule Braunschweig, 1970.
- [8] H. Maecker: Plasmastörungen in Lichtbögen infolge eigenmagnetischer Kompression. Zeitschrift für Physik 141(1955)1/2, S. 198...216.

### Adresse des Autors:

Dr. sc. nat. *Joachim Amsler*, Sprecher + Schuh AG, Hochspannungssparatfabrik, Oberentfelden.