

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 63 (1972)
Heft: 18

Artikel: Modelluntersuchungen zur statistischen Verteilung der Schweisskraftwerte von Reinsilber
Autor: Haufe, W. / Reichel, W. / Schreiner, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915732>

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: 23.02.2026

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

Modelluntersuchungen zur statistischen Verteilung der Schweisskraftwerte von Reinsilber

Von W. Haupe, W. Reichel, H. Schreiner und R. Tusche

621.791.014 : 531.781.001.57

Durchgeführte Untersuchungen zeigen am Beispiel des Kontaktwerkstoffes Ag 1000, dass die bei der Schweisskraftmessung unter Verwendung von Kontaktstücken mit Standardabmessungen auftretende statistische Verteilung der Messwerte über mehrere Grössenordnungen nicht auf Unterschiede in der Lichtbogenbrenndauer und Lichtbogenspannung zurückgeführt werden kann. Anhand eines Modellversuches wird gezeigt, dass wesentlich höhere Schweisskräfte bei gleichen Prüfbedingungen auftreten, wenn die Kontaktstückoberflächen in geeignetem Masse verkleinert werden, das heisst, wenn Abstützeffekte entfallen und der Lichtbogen auf der gesamten Fläche brennt. Eine metallographische Untersuchung der Schmelzbereiche verschweisster Kontaktstücke und eine Beurteilung der Bruchflächen nach dem Zerreißen der Schweissbrücken geben Aufschluss über die Struktur der Verschweissungen.

Les essais entrepris montrent, dans le cas de l'argent pur servant de matière de contact sous forme de plaquettes de dimensions normales, que la distribution statistique des valeurs de mesure de la force de soudage s'étendant sur plusieurs ordres de grandeur ne provient pas de différences dans la durée et la tension d'arc. Par un essai sur modèles, on montre que des forces de soudage nettement plus grandes se présentent, dans de mêmes conditions d'essai, lorsque les surfaces des plaquettes de contact sont rendues plus petites, par un moyen approprié, c'est-à-dire quand les effets de support sont supprimés et que l'arc agit sur toute la surface. Un examen métallographique des zones de fusion de pièces de contact soudées par brûlure et une observation des surfaces après rupture des ponts de soudure renseignent sur la structure des soudures par brûlure.

1. Einführung

Als Ursache für die Bildung einer Schweissbrücke bei prellend schliessenden Kontaktstücken ist der Lichtbogen anzusehen. Durch die den Kontaktstücken in den Lichtbogenfusspunkten zugeführte Energie tritt eine Temperaturerhöhung weit über die Schmelztemperatur hinaus auf. Beim Schliessen der Kontaktstücke können die Aufschmelzbereiche verschweissen [1].

Im Rahmen bereits veröffentlichter Arbeiten über das Thema «Schweisskraft» wurde ein Prüfschalter beschrieben, mit dem die Schweisskraft elektrischer Kontaktwerkstoffe unter definierten Prüfbedingungen gemessen werden kann [2]. Dabei erweist sich die statistische Verteilung der Schweisskraftwerte als charakteristisch. Für Ag 1000 ergibt sich ein Wertebereich der Schweisskraft von zwei bis drei Grössenordnungen [3; 4]. Da die mechanischen und elektrischen Prüfbedingungen während einer Messreihe konstant gehalten werden, kann die statistische Verteilung der Schweisskraftwerte nur von einer unterschiedlichen Energie der Prellichtbögen, vom Verhalten des Lichtbogens auf den Kontaktstückoberflächen und von der Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktstücke durch den Schaltvorgang abhängen. Durch Modellversuche sollen diese Einflüsse für den Kontaktwerkstoff Ag 1000 näher untersucht werden.

2. Prüfbedingungen

Bei einer Schliessgeschwindigkeit der Kontaktstücke von $v_s = 1 \text{ m s}^{-1}$ und einer Kontaktkraft von $F_K = 58,8 \text{ N}$ wurde die Prelldauer für die ersten drei Prellsprünge unter rein mechanischen Bedingungen auf 5 ms eingestellt. Der Durchmesser der Kontaktstücke betrug $d = 10 \text{ mm}$. Die Oberfläche des beweglichen Kontaktstückes war ballig, $r = 40 \text{ mm}$ und die des feststehenden Kontaktstückes flach (Standardabmessungen). Die Prüfspannung betrug $U = 220 \text{ V}$, die Frequenz $f = 50 \text{ Hz}$, der Prüfstrom $\hat{I} = 1000 \text{ A}$, der Leistungsfaktor $\cos\varphi = 0,12$ und die Schaltzahl $n_s = 1000$. Der induktive Prüf-

stromkreis wurde durch die Kontaktstücke im natürlichen Stromnulldurchgang mit einer Toleranz von $\pm 0,1 \text{ ms}$ geschlossen. Das bewegliche Kontaktstück hatte positive Polarität.

3. Energie der Prellichtbögen

Fig. 1 zeigt eine aus 2×1000 Messwerten gebildete mittlere Summenhäufigkeitskurve der Schweisskraft von Ag 1000 im Weibull-Wahrscheinlichkeitsnetz. Die Schweisskräfte unter 3 N sind für Niederspannungsschaltgeräte der Starkstromtechnik von untergeordneter Bedeutung und wurden daher bei der Darstellung nicht berücksichtigt. Der maximale Schweisskraftwert ($F_{s99,9}$ -Wert) beträgt 420 N. Dies bedeutet, dass sich in diesem Falle die Schweisskraftwerte über den grossen Bereich $3 \text{ N} \leq F_s \leq 420 \text{ N}$ verteilen.

Eine Erklärung für die Schwankungsbreite der Schweisskraftwerte kann zunächst in einer unterschiedlichen Energie, die den Kontaktstücken durch die Lichtbogenfusspunkte zugeführt wird, gesucht werden. Die Lichtbogenenergie lässt sich näherungsweise berechnen [5]. Mit den Bezeichnungen

\hat{I}	Scheitelwert des Prüfstromes
$i(t)$	Prüfstrom
$u_L(t)$	Lichtbogenspannung
t_L	Brenndauer des Lichtbogens
W_L	Lichtbogenenergie
$\omega = 2\pi f$	Kreisfrequenz des Prüfstromes

erhält man die Lichtbogenenergie aus der Beziehung:

$$W_L = \int_0^{t_L} u_L(t) \cdot i(t) dt \quad (1)$$

Der Prüfstrom hat sinusförmigen Verlauf:

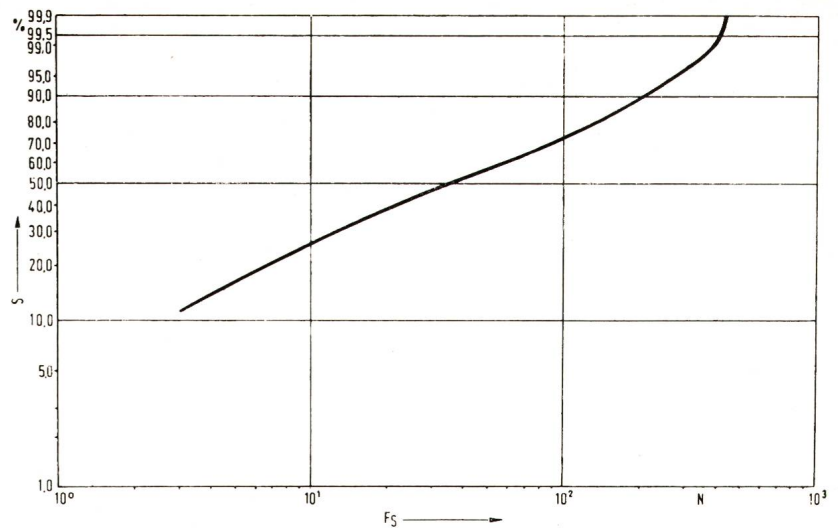
$$i(t) = \hat{I} \cdot \sin \omega t \quad (2)$$

Durch Substitution von Gl. (2) in Gl. (1) ergibt sich:

$$W_L = \int_0^{t_L} u_L(t) \cdot \hat{I} \cdot \sin \omega t dt$$

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Fig. 1
Summenhäufigkeit S der Schweisskraft F_S von Ag 1000 im Weibull-Wahrscheinlichkeitsnetz



Die Rechnung lässt sich wesentlich vereinfachen, wenn man für die Lichtbogen­spannung einen Mittelwert \bar{U}_L annimmt. Dann wird

$$W_L = \bar{U}_L \hat{I} \int_0^{t_L} \sin \omega t dt$$

oder

$$W_L = \frac{\bar{U}_L \hat{I}}{\omega} (1 - \cos \omega t_L) \quad (3)$$

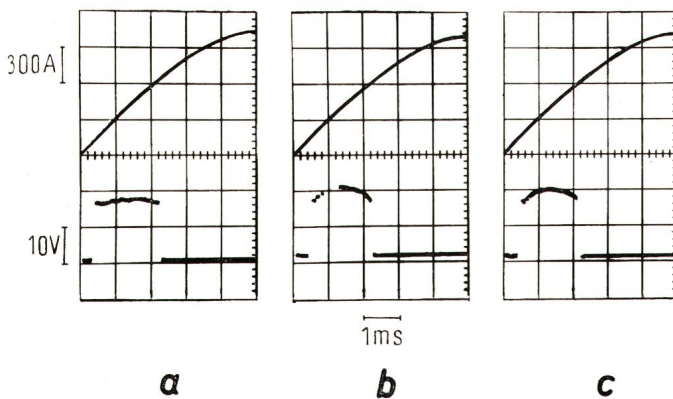


Fig. 2

Einschaltvorgang unter Prüfstrom $\hat{I} = 1000 \text{ A}$, $n_S = 1000$
a zehnte Schaltung, $F_S = 58,8 \text{ N}$
b fünfhundertste Schaltung, $F_S = 79,5 \text{ N}$
c eintausendste Schaltung, $F_S = 167 \text{ N}$

In der Beziehung (3) sind die Grössen \bar{U}_L , \hat{I} und ω konstant. Eine Änderung der Lichtbogenenergie während einer Messreihe kann daher nur durch eine Schwankung von t_L verursacht werden. Die Oszillogramme der Fig. 2 zeigen als Beispiele den Einschaltvorgang bei der zehnten, fünfhundertsten und eintausendsten Schaltung innerhalb einer Messreihe. Ausserdem ist der jeweils gemessene Schweisskraftwert (F_S -Wert) angegeben.

Wegen der schnellen Vernichtung der Prellenergie durch die dämpfende Wirkung der Schmelzbereiche in den Lichtbogenfusspunkten wurde bei den genannten Prüfbedingungen überwiegend ein Prellsprung beobachtet; vereinzelt traten auch zwei Prellsprünge auf, die jedoch während der Beobachtungsdauer nicht zu besonders hohen Schweisskräften führten.

Die Grösse der Lichtbogen­spannung ist vom Werkstoff abhängig [6]. Sie schwankt bei Reinsilber zwischen $U_L = 16 \text{ V}$ und $U_L = 19 \text{ V}$. Der Mittelwert beträgt $\bar{U}_L = 17 \text{ V}$.

Die Werte der Lichtbogen­brenndauer folgen einer Gaußschen Normalverteilung. Der Mittelwert lag bei $t_L = 1,7 \text{ ms}$ mit einer Standardabweichung von $\pm 0,2 \text{ ms}$. Nach Gl. (3) ergibt sich ein mittlerer Wert der pro Einschaltung im Lichtbogen umgesetzten Energie von $W_L = 7,5 \text{ Js}$. Der den Kontaktstücken in den Lichtbogenfusspunkten zugeführte Energie-

anteil ist aus Gründen der Wärmestrahlung und Wärmeab­leitung kleiner als die errechnete Lichtbogenenergie.

Eine funktionale Abhängigkeit der Schweisskraft von der Lichtbogenenergie besteht nicht, da der Zusammenhang korrelativ ist. Die Auswertung einer Vielzahl von Oszillogrammen des Einschaltvorganges unter Prüfstrom bezüglich Lichtbogen­brenndauer und Lichtbogen­spannung über mehrere Messreihen ergab, dass diese Grössen nur geringen Schwankungen unterliegen.

Da die grosse Streubreite der Schweisskraftwerte nicht durch Unterschiede in der Lichtbogenenergie erklärt werden kann, muss eine andere Einflussgrösse dafür verantwortlich sein. Neben der Lichtbogenenergie stellt der Lichtbogenlauf einen weiteren Einflussparameter auf die Grösse der Schweisskraftwerte dar. Das Laufverhalten des Lichtbogens ist hauptsächlich vom Kontaktwerkstoff, der Beschaffenheit der Kontaktstückoberflächen und der Wirkung des Eigenmagnetfeldes abhängig. Der Lichtbogen kann so abgelenkt werden, dass beim Schliessen der Kontaktstücke die Schmelzbereiche in den Lichtbogenfusspunkten nicht aufeinandertreffen. Zwei charakteristische Fälle der gegenseitigen Lage der Schmelzbereiche zeigt Fig. 3. Im Falle 3a überdecken sich die Schmelzbereiche auf dem beweglichen und feststehenden Kontaktstück im geschlossenen Zustand nur zu einem geringen Teil, es ist daher gar keine oder nur eine kleine Schweisskraft zu erwarten.

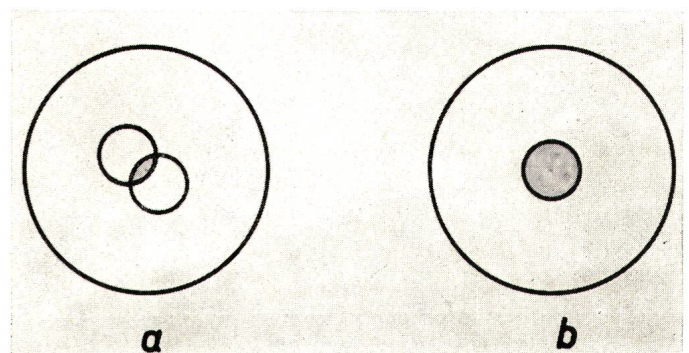


Fig. 3

Möglichkeiten der gegenseitigen Lage der Schmelzbereiche auf den Kontaktstücken
a teilweise überdeckt
b vollständig überdeckt

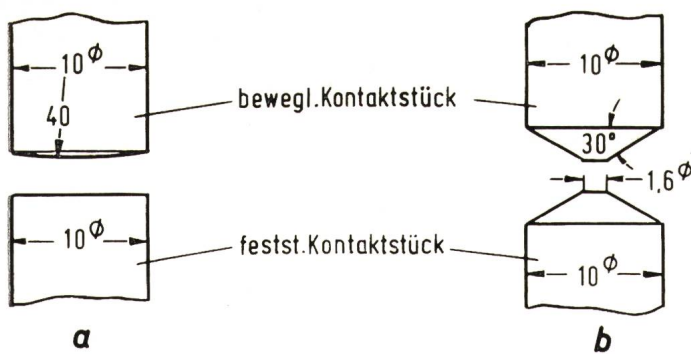


Fig. 4
Kontaktstückanordnung im Prüfschalter
a Kontaktstücke mit Standardabmessungen
b kegelstumpfförmige Kontaktstücke

Fallen die Schmelzbereiche aufeinander (Fig. 3b), so sind bei Erstschaltungen die Voraussetzungen für die Entstehung höherer Schweisskräfte gegeben.

4. Modellversuch zur Schweisskraftmessung

Ein Modellversuch soll zeigen, dass bei verkleinerten Kontaktstückoberflächen, deren Grösse vergleichbar ist mit derjenigen der Aufschmelzbereiche auf den Kontaktstücken mit Standardabmessungen durch das damit verbundene Festhalten der Lichtbogenfusspunkte unter sonst unveränderten Prüfbedingungen wesentlich höhere Schweisskräfte auftreten. Es werden kegelstumpfförmige Kontaktstücke mit einem Durchmesser an der Kontaktstelle von $d = 1,6 \text{ mm}$ verwendet. Dies entspricht einer Grösse der Kontaktstückoberfläche von $A = 2 \text{ mm}^2$. Fig. 4 zeigt die Anordnung der Kontaktstücke mit Standardabmessungen (Fig. 4a) und die beim Modellversuch verwendeten Kontaktstücke (Fig. 4b). Mit den kegelstumpfförmigen Kontaktstücken konnten nur Erstschaltungen durchgeführt werden, da wegen des grossen Abbrandes eine starke Veränderung der Kontaktstückoberflächen und gleichzeitig eine Vergrösserung des Schliessweges auftrat, so dass bei weiteren Schaltungen die Konstanz der Prüfbedingungen nicht mehr garantiert war.

Die an jeweils zehn Kontaktstückpaaren bei Erstschaltungen gemessenen Schweisskraftwerte sind in Tabelle I zusammengestellt. Ein Vergleich der Maximalwerte lässt erkennen, dass der höchste Schweisskraftwert, der an den kegelstumpf-

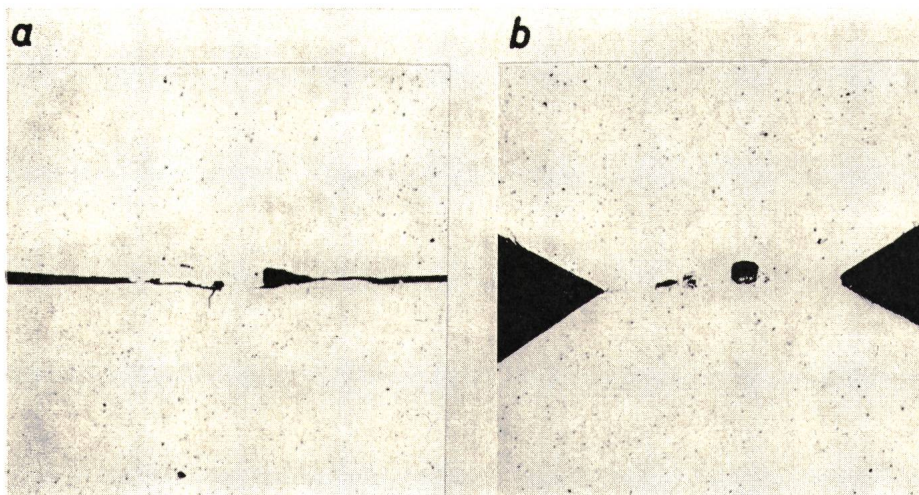
förmigen Kontaktstücken gemessen wurde, etwa dreimal höher liegt als bei den Kontaktstücken mit Standardabmessungen. Die Mittelwerte liegen im Vergleich zu diesen sogar um den Faktor 5 höher.

Zur Beurteilung der Schweissbrücken, die sich nach der Erstschaltung zwischen den Kontaktstücken mit Standardabmessungen bzw. den kegelstumpfförmigen Kontaktstücken gebildet haben, wurden metallographische Schliffe senkrecht zur Kontaktebene durch den Mittelpunkt der Schmelzbereiche angefertigt (Fig. 5). In den Schmelzbereichen sind Hohlräume unterschiedlicher Grösse vorhanden. Die Entstehung solcher Hohlräume ist darauf zurückzuführen, dass durch Gasausbrüche infolge der Lichtbogeneinwirkung und durch den Schliessvorgang ein Teil der Schmelze aus den Lichtbogenfusspunktgebieten verspritzt wird. Die Fig. 6 zeigt als Beispiele Makroaufnahmen der Bruchflächen nach dem Zerreißen der Schweissbrücken. Auch hier sind in den Schmelzbereichen die Hohlräume zu erkennen, die bei den Kontaktstücken mit Standardabmessungen wesentlich grösser sind als bei den kegelstumpfförmigen Kontaktstücken. Je kleiner die tatsächlich verschweisste Fläche ist, um so kleiner ist auch die Schweisskraft, da zwischen den beiden Grössen ein proportionaler Zusammenhang besteht. Ausserdem ist aus Fig. 6 er-

Messwerte der Schweisskraft von Ag 1000 bei Erstschaltungen mit Kontaktstücken verschiedener Abmessungen

Tabelle I

Kontaktstück-paar-Nr.	Schweisskraft F_S	
	Kontaktstücke mit Standardabmessungen N	Kegelstumpfförmige Kontaktstücke N
1	531	1087
2	282	768
3	248	1121
4	207	966
5	144	1421
6	69	612
7	171	1420
8	246	1120
9	106	777
10	150	1020
\bar{F}_S	215	1032
$F_{S \text{ max}}$	531	1421



sichtlich, dass sich die verdrängte bzw. verspritzte Schmelze kranzförmig an den Rändern der Lichtbogenfusspunktgebiete ablagert und strahlenförmig von den Kontaktstückoberflächen absteht.

Die unterschiedliche Grösse der Schweisskraftwerte der beiden Kontaktstückformen lässt sich durch Abstützeffekte an den Rändern der Schmelz-

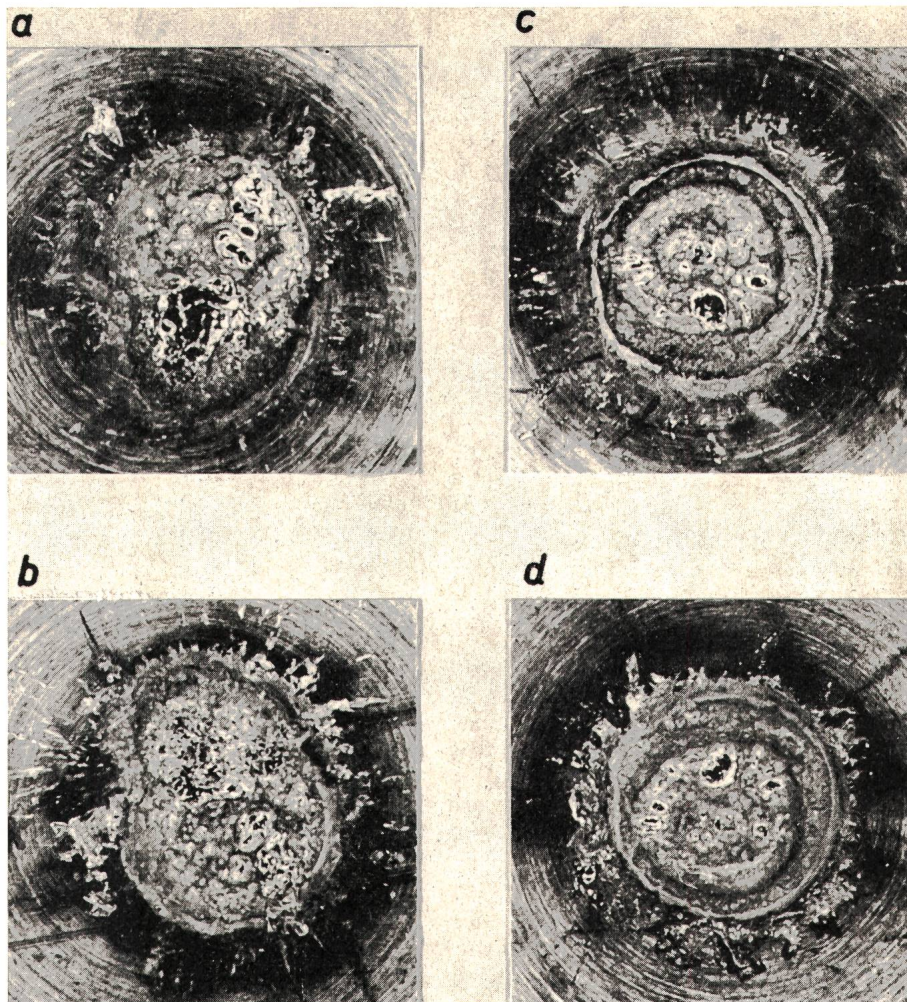
Fig. 5
Schliffbilder der Schweissbrücken senkrecht zur Kontaktebene nach der Erstschaltung
Maßstab 15 : 1

a Kontaktstücke mit Standardabmessungen
b kegelstumpfförmige Kontaktstücke

Fig. 6
Schmelzbereiche auf den Kontaktstücken nach der Erstschtaltung und Aussehen der Bruchflächen nach dem Zerreißen der Schweissbrücken

Maßstab 15 : 1

- a bewegliches Kontaktstück, Anode, ballig, $r = 40 \text{ mm}$, $t_L = 1,76 \text{ ms}$, $F_S = 402 \text{ N}$
 b feststehendes Kontaktstück, Kathode, flach, $t_L = 1,76 \text{ ms}$, $F_S = 402 \text{ N}$
 c bewegliches Kontaktstück, Anode, kegelstumpfförmig, $t_L = 1,69 \text{ ms}$, $F_S = 942 \text{ N}$
 d feststehendes Kontaktstück, Kathode, kegelstumpfförmig, $t_L = 1,69 \text{ ms}$, $F_S = 942 \text{ N}$



bereiche auf den Kontaktstücken mit Standardabmessungen erklären. Bei diesen Kontaktstücken können sich Schweissbrücken zwischen den genannten Rändern und durch die in den Lichtbogenfusspunktgebieten verbliebene Schmelze bilden. Bei den kegelstumpfförmigen Kontaktstücken hingegen fehlt der Abstützeffekt, so dass diese über die gesamte Kontaktfläche verschweissen können. Dadurch ist die Wahrscheinlichkeit des Auftretens hoher Schweisskraftwerte sehr gross. Die durch den Modellversuch gewonnenen Erkenntnisse erklären die Tatsache, dass bei Schweisskraftmessungen unter Verwendung von Kontaktstücken mit Standardabmessungen die Schweisskräfte einen gewissen maximalen Wert, der für Ag 1000 unter den im Abschnitt 2 genannten Prüfbedingungen etwa bei 500 N liegt, nicht überschreiten können.

Literatur

- [1] E. Geldner u. a.: Ursachen der Schweissbrückenbildung und Einflüsse auf die Schweisskraft elektrischer Kontaktstücke in der Energietechnik. ETZ-A 93(1972)5, S. 305...306.
- [2] E. Geldner u. a.: Prüfschalter zur Messung der Schweisskraft von Kontaktwerkstoffen für die Starkstromtechnik. ETZ-A 92(1971)11, S. 637...642.
- [3] W. Haupe u. a.: Einfluss der Schaltzahl und Polarität des Prüfstromes auf die Statistik der Schweisskraftwerte von Reinsilber bei synchronem

und unsynchronem Schliessen der Kontaktstücke. Bull. SEV 62(1972)9, S. 461...467.

- [4] E. Geldner u. a.: Schweisskraft von Reinsilber, Reinkupfer und verschiedenen Kontaktwerkstoffen auf Silberbasis. ETZ-A 93(1972)4, S. 216...220.
- [5] E. Walczuk: Über den Einfluss der Energie der Prelllichtbögen auf das Verschweissen von Kontakten. E und M 87(1970)4, S. 197...203.
- [6] A. Erk und H. Finke: Über das Verhalten unterschiedlicher Kontaktwerkstoffe beim Einschalten prellender Starkstrom-Schaltglieder. ETZ-A 86(1965)9, S. 297...302.

Adresse der Autoren:

W. Haupe, W. Reichel, H. Schreiner und R. Tusche, Siemens AG, Zentrale Fertigungsaufgaben, Fertigungstechnische Entwicklung, Katzwangerstr. 150, D-8500 Nürnberg.