

UNTERSUCHUNG DER LICHTBOGEN-SCHWEISSGLEICHRICHTER

Von

K. KURUTZ

Lehrstuhl für Verkehrselektrotechnik, Technische Universität, Budapest

(Eingegangen am 31. März 1969)

Vorgelegt von Prof. Dr. T. KELEMEN

Die rasche Entwicklung der Halbleiterherstellung in den letzten Jahrzehnten schuf auch in der Herstellung von Lichtbogen-Schweißmaschinen neue Möglichkeiten. Diese Konstruktion vereinigt die günstigen Eigenschaften der Schweißtransformatoren und Schweißdynamos. Zum Vergleich der Typen mittlerer Leistung wurden ihre wichtigsten Angaben in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1

Vergleich der Lichtbogen-Schweißmaschinen

Daten	Dynamos	Gleichrichter	Transformatoren
Wirkungsgrad %	50—60	60—70	70—90
$\cos \varphi$	0,85—0,9	0,6—0,7	0,3—0,4
Relative Scheinleistung im Leerlauf ..	1	0,3	0,2
Belastung des Drehstromnetzes	gleichmäßig	gleichmäßig	einphasig
Relativer Preis	1	1	0,4—0,6
Relatives Gewicht	1	0,8	0,6
Schweißstrom	Gleichstrom	Gleichstrom	Wechselstrom

Der Schweißgleichrichter ist netzseitig betrachtet ein Drehstromtransformator mit gleichmäßiger Belastung des Netzes; schweißseitig hingegen ein Dynamo mit dessen günstiger Lichtbogenstabilitätseigenschaft. Besonders nennenswert ist die relativ kleine Leerlaufleistung sowie die praktisch unbeschränkte Lebensdauer durch Wegfall der Lager- und Bürstenabnutzung.

Aufbau der Schweißgleichrichter

Die Lichtbogen-Schweißmaschinen können technologisch in zwei Hauptgruppen geteilt werden. Diese Gruppen können auch vom Gesichtspunkte der statischen Kennlinienform unterteilt werden, u. zw. in Maschinen mit »fallender« und mit »flacher« Kennlinie, je nach Spannungsabhängigkeit oder

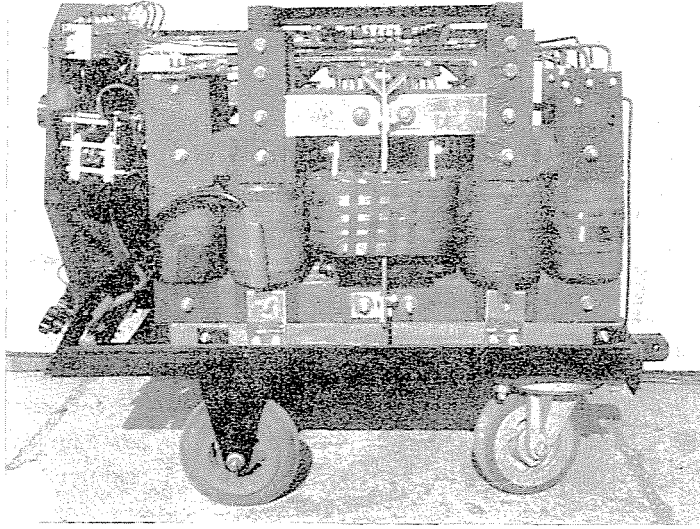


Abb. 1

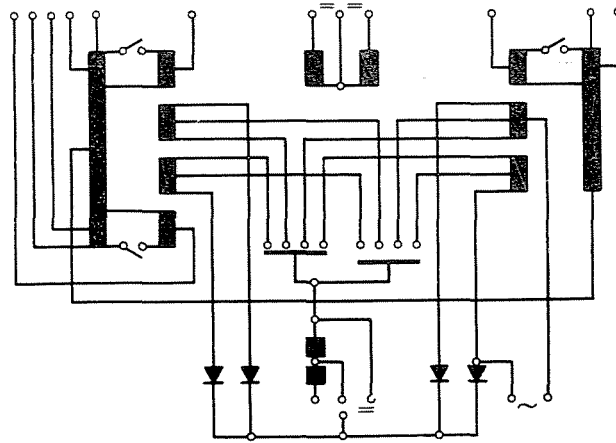


Abb. 2

Unabhängigkeit des Schweißstromes. Beide Kennlinien können auch durch Schweißgleichrichter verwirklicht werden, und es gibt sogar Konstruktionen, die umschaltbar mit beiden Kennlinienformen arbeiten. Tabelle 2 und 3 zeigen einige Möglichkeiten und geben relative Ziffern zum Vergleich der aktiven Gewichte. Die angegebenen Typen haben wir vom Gesichtspunkte der Schweißstromereinstellung, sowie den statischen und dynamischen Eigenschaften untersucht. Von den in den Tabellen 2 und 3 angegebenen Typen wird in Abb. 1 ein in Ungarn gebauter Schweißgleichrichter in Scott-Schaltung mit Schaltplan gezeigt, umschaltbar für fallende und flache Kennlinien (Abb. 2).

Tabelle 2
Maschinen mit fallender Kennlinie

Bezeichnung	Benennung	Schaltbild	Relatives Gewicht
—	Drehstrom- Transf.		1
E 1.	Drehstrom- Tr. mit Luftspaltdrossel		1,6
E 2.	Drehstrom- Tr. mit Transduktor		2,73
E 3.	Drehstrom- Tr. mit Vormagn.- Drossel		2,6
E 4.	Drehstromstreutr. mit mech. Steuerung		1,2
E 5.	Drehstromstreutr. mit el. Steuerung		1,4
E 6.	3× Einphasen- Tr. mit el. Steuerung		2,61
E 7.	Scott-Streutransf. mit el. Steuerung	Siehe Abb. 2.	1,8
E 8.	Drehstrom- Tr. mit steuerbarem Gleichr.		1,2

Tabelle 3
Maschinen mit flacher Kennlinie

Bezeichnung	Benennung	Schaltbild	Relatives Gewicht
—	Drehstrom- Transf.		1
L 1.	Drehstrom- Tr. mit Anzapfungen		1,12
L 2.	Drehstrom- Tr. mit Hilfstransformator		2
L 3.	Drehstrom- Tr. mit stromssteuerndem Td.		2,73
L 4.	Drehstrom- Tr. mit spannungssteuerndem Transduktor		1,63
L 5.	Drehstrom- Tr. mit Anzapfungen und Td.		1,5
L 6.	Scott- Transformator mit Selbstsättigung	Siehe Abb. 2.	2
L 7.	Drehstrom- Tr. mit steuerbarem Gleichr.		1,2

Die Untersuchungen ergaben, daß bei den Typen in Tabelle 2 zwischen den Schweiß Eigenschaften und Steuerungssystemen ein enger Zusammenhang besteht. Dementsprechend können die Maschinen in folgende Gruppen unterteilt werden:

Maschinen mit mechanischer Steuerung: E 1 und E 4. Maschinen mit transduktorischer Steuerung: E 2 und E 3. Streutransformatoren mit Vormagnetisierung gesteuert: E 5, E 6 und E 7.

Maschine mit von der Steuerung abhängigen Schweiß Eigenschaften: E 8.

Diese Maschinen hatten außer Type »L 3« gute Schweiß Eigenschaften, weil beim Versuch die Zeitkonstante des Schweißstromkreises, verglichen mit der Zeitkonstante des Dynamos, entsprechend klein war. Hiedurch konnte die — besonders bei dem Schutzgasschweißen wichtige — Forderung der sehr raschen Stromänderung gut erfüllt werden.

Schweiß Eigenschaften

A) Maschinen mit fallender Kennlinie

Gegen Ende der 50er Jahre, als die Schweißgleichrichter zuerst aus der Einfuhr, dann im Land hergestellt erschienen, wurden sie von den Schweißfachleuten als »hart« beurteilt.

1. Dieser Charakter machte sich dadurch bemerkbar, daß während der Tropfenkurzschlüsse sehr große Stromspitzen entstanden, die den Tropfen sozusagen explosionsartig in das Schweißgut schossen und dadurch den Spritzverlust im Vergleich zum Spritzverlust des Dynamos wesentlich vergrößerten.

2. Ein zweiter Nachteil war, wieder im Vergleich zum Dynamo, der Durchbrand dünner Bleche, besonders oft nach dem Zeitpunkt der Zündung.

3. Schließlich mußten ziemlich häufig vorkommende Diodenfehler festgestellt werden.

Nach Aufklärung einiger Nachteile und Fehler sowie Feststellung der Ansprüche begannen die wissenschaftlichen Untersuchungen am Lehrstuhl unserer Universität mit dem Zweck, das Wesen der Erscheinungen zu erfassen und hiedurch die bisherigen Mängel und Fehler zu beseitigen. Zu Beginn der Arbeit standen uns hauptsächlich nur die Scheinwiderstandstheorien zwecks Qualifizierung der Maschinen zur Verfügung, durch die von etwa 1930 fast bis zu unseren Tagen versucht wurde, die Schweiß Eigenschaften der Schweißtransformatoren und Dynamos zu erklären. Ein großer Teil dieser Facharbeiten ist im Buch KÖNIGSHOFERS [1] ausführlich zusammengefaßt. Als dann Schweißgleichrichter mit fallender Kennlinie nach diesem Prinzip qualifiziert

wurden, fanden wir, daß — wie in Abb. 3 gezeigt — das Verhältnis $\frac{U_0}{I_{kz\ dyn}} = \operatorname{tg} \alpha$

bedeutend kleinere Werte ergab, als das Verhältnis $\frac{U_{0\ dyn}}{I_{kz\ stat}} = \operatorname{tg} \beta$. Die Werte

von $\operatorname{tg} \alpha$ und $\operatorname{tg} \beta$ in Abb. 3 ebenfalls eingetragen, fanden wir nach der Qualifizierungskurve von Königshofer, daß die Maschine nach $\operatorname{tg} \alpha$ geeicht, den Anforderungen nicht entspricht, obwohl in bezug auf $\operatorname{tg} \beta$ die Konstruktion als einwandfrei zu betrachten wäre. (Die Werte von $\operatorname{tg} \alpha$ und $\operatorname{tg} \beta$ sind dagegen bei Dynamos annähernd die gleichen.)

In den letzten Jahren fand man in der Fachliteratur, daß eine Qualifizierung nach dem Scheinwiderstandsverfahren zu keinen befriedigenden Folgerun-

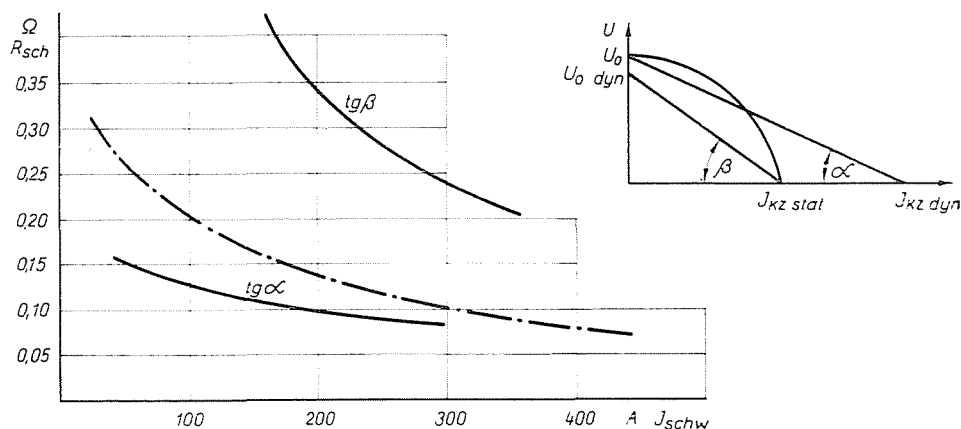


Abb. 3

gen führt. Im Jahr 1956 publizierte CARRER die Schlußfolgerungen seiner Untersuchungen [2] und behauptete, daß es richtiger wäre, Schweißigenschaften der Dynamos aufgrund der Oszillogramme der Schweißspannung zu beurteilen. In seiner Arbeit gibt er auch die numerischen Größen der Spannungsrückkehr an. Diese Methode, die WEINSCHENK [3] für Dynamos als die beste bezeichnete, wurde auch von uns zur Untersuchung der Schweißgleichrichter angewendet. Wir fanden, daß einige von diesen im Betrieb bis zur völligen Unbrauchbarkeit stark spritzten, trotzdem sämtliche Schweißgleichrichter nach dem Carrer-Verfahren untersucht und bewertet, eigentlich einwandfrei arbeiten sollten.

Beide Methoden scheinen also für die Beurteilung der Lichtbogenzündung gut anwendbar zu sein, zur Aufdeckung der Umstände hingegen, die fehlerhafte Tropfenübergänge verursachen, mußten neue Wege eingeschlagen werden.

Diese Wege führten zunächst zur Untersuchung der Tropfenübergänge. Die Physik dieser Erscheinung war aus mehreren Arbeiten bekannt. Kurz zusammengefaßt: der Schweißstrom und sein magnetisches Feld versuchen, zufolge des Lorentzschen Gesetzes den Tropfen der Elektrode zu entreißen. Außer dieser Kraft, — durch die das Überkopfschweißen erst ermöglicht wird — wirken auf den Tropfen noch mehrere andere Kräfte, u. zw. die Schwer-

kraft: die elektrostatische und Anziehungskraft der Massen; Gasdrücke, die die Verdampfung sowie Kondensierung des Elektroden- und Umhüllungs-Materials verursachen; schließlich auch die Oberflächenspannung des Schweißbades. Zur Vereinfachung der Verhältnisse wurden diese Faktoren möglichst konstant gehalten, und der Tropfenübergang wurde nur bei veränderlichen elektrischen Kenngrößen untersucht.

Die Lorenzsche Kraft, die in den englischen Fachzeitschriften und Arbeiten Pinch-Kraft genannt wird, kann als das Vektorprodukt aus der Stromdichte und der magnetischen Felddichte des Schweißstromes berechnet werden. (Es sei hier auf die Arbeit von WELLS [4], betr. Verhältnisse im Schweißlichtbogen verwiesen.) Die Lorenz-Pinchsche Kraft läßt sich (hier ohne Ableitung) nach folgender Gleichung berechnen:

$$F = I^2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (1)$$

wo

F die auf den Tropfen wirkende Kraft in Newton

I die Schweißstromstärke in Amper

R_1 und R_2 den Halbmesser der Elektrode bzw. des Tropfens in Metern bedeuten.

Im Schweißlichtbogen sind der Druck und die Temperatur des durch Thermo- und Lavineneffekte ionisierten Gases Funktionen des Ortes, d. h. der Stelle im Lichtbogen. Diese Druckunterschiede im Plasma üben ebenfalls Kraftwirkungen auf den Tropfen aus, mit dem nach der von Wells veröffentlichten Methode abgeleiteten Wert:

$$F_p = I^2 \cdot 10^{-7} \left(\frac{1}{2} \frac{T_1}{T_0} + \frac{1}{4} \ln \frac{T_1}{T_0} \right) \quad (2)$$

In dieser Gleichung haben F und I dieselbe Bedeutung, wie in Gl. (1), T_1 bzw. T_0 bezeichnen die Temperaturen am Ende der Elektrode bzw. in der Mitte des Lichtbogenplasmas.

Beide nach Gl. (1) und (2) berechneten Kräfte sind von der Stromstärke quadratisch abhängig. Sie wirken während des Tropfenkurzschlusses und halten an bis zum Erscheinen des Dauerkurzschlusses. Die Summe dieser Kräfte übt auf den Tropfen einen Impuls aus, dessen Wert aus folgender Gleichung zu bestimmen ist:

$$\int_0^t F \cdot dt = c \cdot \int_0^t I_{sp}^2 \cdot dt \quad (3)$$

I_{sp} bedeutet hier den Spitzenstrom während des Tropfenüberganges in Amper,

t die Dauer des Tropfenüberganges (etwa 0.01 s),

c eine Proportionalitätskonstante

Wäre — laut unserer Theorie — nun dieser Impuls zu klein, so entstünde eine minderwertige Einbrandtiefe; wäre er aber zu groß, dann käme durch das Überschreiten der Oberflächenspannung explosionsartiges Spritzen vor.

Statt der Bestimmung der schwer meßbaren Oberflächenspannung ist es zweckmäßiger, den rechtsstehenden Ausdruck in Gl. 3 auf eine Größe zu beziehen, die der Schmelzwärme des Schweißmaterials proportional ist. Es gilt also der Quotient:

$$\frac{c \cdot \int_0^t I_{sp}^2 \cdot dt}{I_{schw}^2 \cdot t} \quad (4)$$

wobei

I_{schw} den Mittelwert des Schweißstromes und

t die Zeitdauer des Tropfenüberganges bedeuten.

Dieser Quotient ist nun auch für die Überlastbarkeit der Dioden maßgebend. Kleinere Werte deuten auf geringere Belastung, daher längere Lebensdauer.

Zur Bewertung des Ausdruckes (4) könnte eigentlich die oszillographische Aufnahme des Schweißprozesses dienen, doch wäre die Auswertung dieser Aufnahme mühevoll. Im Interesse der Anwendbarkeit unserer theoretischen Voraussetzungen und Ergebnisse auf die Schweißpraxis, wurden anstatt der den Schweißprozeß mannigfaltig beeinflussenden Beziehungen nur die Parameter in Betracht gezogen, die sich auf die Eigenschaften der Schweißmaschine beschränken. Die dynamischen Eigenschaften der Maschine können am besten durch Strom- und Spannungs-Oszillogramme der »Leerlauf-Kurzschluß-Leerlauf« Periode beurteilt werden. Diese Untersuchungen bewiesen, daß nach Kurzschluß die Spannung des Schweißgleichrichters ausnahmslos sprunghaft den Leerlaufwert erreichte. Dieser Eigenschaft ist es eben zuzuschreiben, daß die Zündung des Lichtbogens nach Tropfenübergang immer ohne Verzögerung zustande kommt.

Das Stromoszillogramm, dessen typische Form in Abb. 4 dargestellt ist, beginnt im Moment des Kurzschlusses unter einem Neigungswinkel γ , und wächst dann nahezu exponentiell bis zu seinem Spitzenwert von $I_{kz\,dyn}$ an. Hier beginnt dann die ebenfalls exponentielle Abnahme, mit der Zeitkonstante T' bis zum Wert $I_{kz\,stat}$.

Dieser Beschreibung folgend begannen nun unsere Untersuchungen. Die Schweißoszillogramme der Maschinen wurden der Reihe nach aufgenommen, dann wurden diese Bilder ohne Ausnahme mit den Ergebnissen und Erfahrungen beim praktischen Schweißen (mit der betreffenden Maschine) verglichen.

Als Resultat der Untersuchungen konnte festgestellt werden, daß bei Maschinen mit starker Spritzbildung sowohl die Kurzschlußstromspitze, wie auch die Dämpfungszeitkonstante T' hohe Werte aufwiesen.

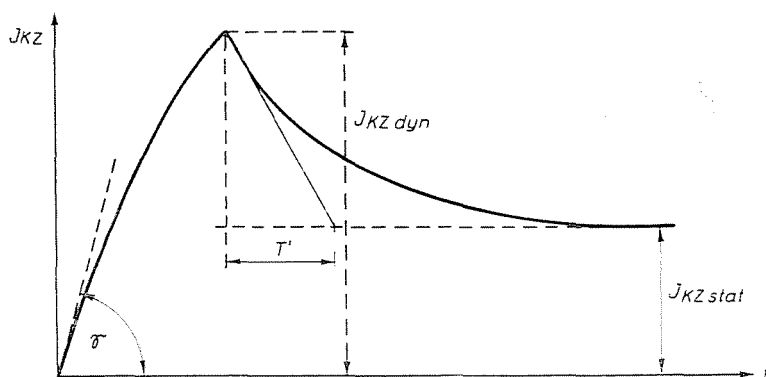


Abb. 4

Zur praktischen Anwendung des Ausdruckes (4) wurden folgende Vereinfachungen eingeführt:

a) Anstatt (4) rechneten wir zweckmäßig mit der Quadratwurzel des Verhältnisses:

$$\frac{I_{kz \text{ dyn}}^2}{I_{schw}^2}$$

in Anbetracht des Umstandes, daß die Tropfenübergangszeit im Vergleich zur Zeitkonstante T' vernachlässigbar kurz ist. Dieser Vernachlässigung ungeachtet muß aber T' zur Beurteilung der Schweiß Eigenschaften trotzdem in Betracht gezogen werden, weil sich mit Verminderung dieser Größe nicht nur die Tropfenübergangsverhältnisse verbessern, sondern auch die Gefahr des Durchbrennens dünner Bleche (oben unter »Nachteil 2« erwähnt) verringert wird. Die Meßergebnisse ergaben nämlich, daß wenn T' im Bereich kleiner Ströme den Wert von 0,02 s nicht überschritt, kein Einbrand mehr zu beobachten war.

b) Für die praktische Anwendung obiger Verhältniszahl ist es zweckmäßig, diese in 2 Teile, wie folgt, zu zerlegen:

$$\frac{I_{kz \text{ dyn}}}{I_{schw}} = \frac{I_{kz \text{ dyn}}}{I_{kz \text{ stat}}} \cdot \frac{I_{kz \text{ stat}}}{I_{schw}} = D \cdot S \quad (5)$$

weil der dynamische Koeffizient D aus dem Kurzschlußoszillogramm, und der statische S aus der statischen Kennlinie zu bestimmen ist.

Es ist zur Beurteilung der Maschine zweckmäßig, außer den Koeffizienten D und S auch noch $M \cdot \text{tg} \gamma$ in Abb. 4, also den Wert der Stromanstiegsgeschwindigkeit zu bestimmen. Wie schon dargelegt, entstehen nämlich durch

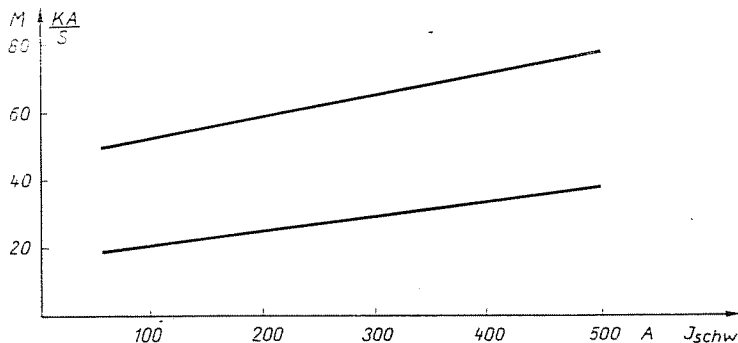


Abb. 5

zu schnelle Stromanstiegsgeschwindigkeiten kalte Tropfen, die im Schweißbad ein sehr starkes Spritzen verursachen können. Ein zu langsamer Stromanstieg hat hingegen zur Folge, daß die Elektrode leicht im Bad angeklebt bleibt und sich daher der Lichtbogen erst nach relativ langer Zeit löst. An Hand von Messungen bestimmten wir nun die optimalen Werte von M aus den Anfangsstromanstiegsgeschwindigkeiten der Oszillogramme, die alle in die Zone fielen, die zwischen den beiden Geraden in Abb. 5 liegt.

In Bezug auf das Produkt: $D \cdot S$ wurde folgende Bewertung vorgeschlagen:

Schweißigenschaften des Schweißgleichrichters	Zahlenmäßige Bewertungsangaben des Produktes $D \cdot S$
zu weich, wenn	$1 < D \cdot S < 1.5$
weich, wenn	$1.5 < D \cdot S < 2.5$
mittel, wenn	$2.5 < D \cdot S < 3.5$
hart, wenn	$3.5 < D \cdot S < 4.5$
spritzend, wenn	$4.5 < D \cdot S$

Außer dieser Bewertung wurde auch die erforderliche Steilheit des Arbeitspunktes in der statischen Kennlinie bestimmt. Diese ist

$$1 < S < 1.5$$

Ähnliche Resultate fanden auch HESSE und EINICKE in ihrer Arbeit [5].

B) Maschinen mit flacher Kennlinie

Die Spannung des Schweißkreises dieser Maschinen ist theoretisch, unabhängig von der Schweißstromstärke, konstant. Bei dem Schweißdynamo wird diese Wirkung durch Kompaundierung oder Bürstenverschiebung erreicht. Im Bereich der üblichen Schweißstromstärken weichen die Kennlinien (*b* im Abb. 6) von der idealen Geraden (*a*) etwas ab. Bei den Schweißgleichrichtern

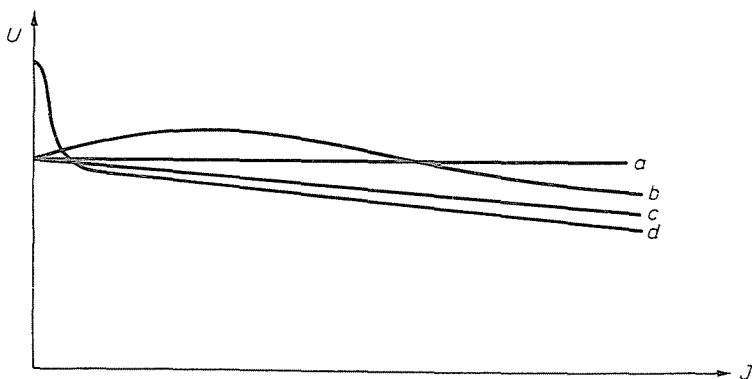


Abb. 6

hingegen ist die statische Kennlinie in jedem Fall etwas fallend (Kurve *c*) wegen des inneren Spannungsabfalls, und verläuft im Fall einer Amplitatschaltung nach Kurve *d* (Abb. 6). Die Untersuchungen ergaben, daß die statischen Kennlinien der Schutzgasschweißung genügend flach waren, wenn ihre statische Steilheiten den Wert von 4 Volt/100 Amper nicht überschritten. Nach Bestimmung der in Betracht kommenden Schweißparameter stellten wir uns die Aufgabe, die optimalen Werte dieser Parameter zu suchen. Zu diesem Zweck mußte vorerst der optimale Regelbereich festgelegt werden, also das Maß der statischen Kennliniendistanz. Nun ist die beste Steuerung bekanntlich die stufenlose. Für praktische Forderungen genügt jedoch eine Steuerung mit etwa 0,5 Volt-Stufen im ganzen Arbeitsbereich.

Die Form der statischen Kennlinie allein bestimmt jedoch die Schweiß-eigenschaften der Maschinen noch nicht. Die Technologie des Schutzgasschweißens fordert auch eine rasche innere Regelung der Maschine, weil die Konstanthaltung der Lichtbogenlänge eben durch die rasche Änderung der Abschmelzleistung der Maschine gesichert wird. Die erforderliche große Eingriffgeschwindigkeit der Maschine bereitete bei Schweißdynamos oft bedeutende Schwierigkeiten, wegen der vorhandenen Induktivität des Ankers. Bezüglich des Schweißgleichrichters fanden wir jedoch, daß alle untersuchten Maschinen genügend große Stromanstieggeschwindigkeiten hatten, daß aber die erforderlichen Werte von M (Anstieggeschwindigkeit des Schweißstromes) nur durch zusätzlich eingeschaltete Induktivitäten erreicht werden konnten.

Zur Bewertung von M wird im allgemeinen das Schweißstrom-Oszillogramm benutzt. Da wir diese Methode für zu umständlich hielten, versuchten wir ein neues, einfacheres Verfahren einzuführen. Es sollte reproduzierbar sein, und soll alle Störungen, die nicht von den Eigenschaften der Maschine herühren, ausschließen. Das prinzipielle Schaltbild dieses Verfahrens zeigt Abb. 7.

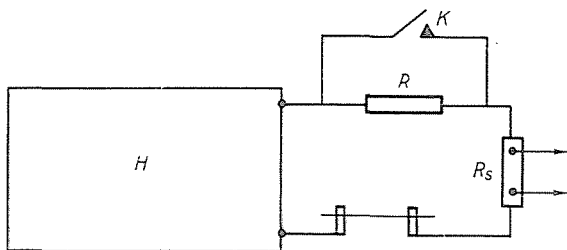


Abb. 7

Hier bedeuten H die Schweißmaschine, R den Belastungswiderstand und R_s den Nebenschlußwiderstand zum Registrieren der Ströme. Der Belastungskreis von H bestand außer R und R_s noch aus einem Elektrodenstück. Dieses wurde nach Einstellung eines Belastungsstromes (durch R) auf Betriebswärme erhitzt und dann, nach Kurzschließen des Widerstandes R , von dem hiedurch ansteigenden Strom verschmolzen. Gleichzeitig nahm ein Oszillograph, an R_s angeschlossen, das Bild des ansteigenden Stromes auf. Aus diesem Oszillogramm konnte dann der Wert von M leicht ermittelt werden.

Qualifizierung der Schweißgleichrichter

A) Maschinen mit fallender Kennlinie

Mit Hilfe des beschriebenen Meßverfahrens wurden alle in Tafel 2 beschriebenen Typen geprüft. Vor allem trachteten wir, die in Abb. 4 angegebene typische Form des transienten Kurzschlußstromes theoretisch zu erklären, da unsere Bewertungstheorie gerade auf diese Eigenheit der Maschine gestützt werden sollte. In Abb. 8 ist diese Stromkurve zur deutlicheren Erklärung nochmals etwas idealisiert dargestellt, u. zw. als die resultierende Summe zweier exponentieller Kurven. Der steigende Teil der Stromkurve »i« ist die Zeitfunktion:

$$i_1 = \frac{U}{R'} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) = A(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (6)$$

Es bedeuten hier U die Leerlaufspannung, R' die auf die Schweißklemmen reduzierten Widerstände des Transformators und der Dioden, T die Zeit-

konstante (aus $\frac{L}{R}$ zu berechnen) und L die Induktivität des Gleichstromkreises. Die Stromkurve würde ohne Strombegrenzungsglieder: Drossel, Transduktor, Streujoch, usw., weiter der Funktion (6) folgen. Nun wirken aber

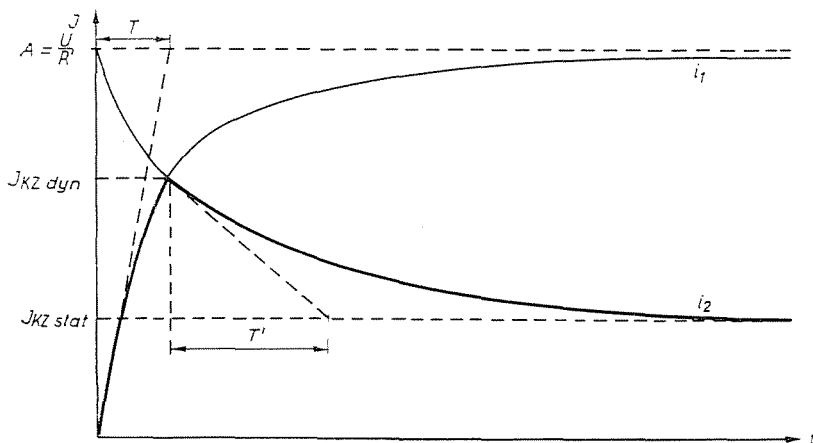


Abb. 8

diese Glieder, und deshalb wurde der fallende Teil der Stromkurve i_2 allein wie folgt bestimmt:

$$i_2 = I_{\text{kz stat}} + (A - I_{\text{kz stat}}) e^{-\frac{t}{T'}} \quad (7)$$

In dieser Zeitfunktion des Stromes bedeutet $A = \frac{U}{R'}$ die dynamische Stromspitze, aber nur im Falle, wenn im Gleichstromkreis gar keine Induktivität vorhanden wäre. In Wirklichkeit treten beide Ströme: i_1 und i_2 zur selben Zeit auf, so darf mit gewisser Vernachlässigung ihr Schnittpunkt als der dynamische Kurzschlußstrom $I_{\text{kz dyn}}$ betrachtet werden. Der Wert der Zeitkonstante T' ist als Summe von T und T'' aufzufassen, wo T'' die Zeitkonstante des Strombegrenzungsgliedes bedeutet.

Die mathematischen Untersuchungen wurden mit Hilfe eines Analogrechners und Annäherung durch Taylor-Polynome durchgeführt, so daß die Kurven nur mit ihren Anfangstangenten in Betracht gezogen wurden. Diese Methode bereitete nur geringe Schwierigkeiten und weist außerdem in die Richtung der größeren Sicherheit. Das Resultat der Berechnungen ist in der folgenden Gleichung enthalten:

$$I_{\text{kz dyn}} = A \frac{1 + c}{c + 2 - d} \quad (8)$$

Hier bedeuten

c das Verhältnis $\frac{T'}{T}$

d das Verhältnis $\frac{I_{kz\ stat}}{A}$, wo A aus Gl. (6) und (7) bereits bekannt ist.

Aus Gl. (8) ergibt sich folgendes:

a) $I_{kz\ dyn}$ vermindert sich, wenn A abnimmt, d. h. wenn die Leerlaufspannung der Maschine kleiner oder der Innenwiderstand größer wird.

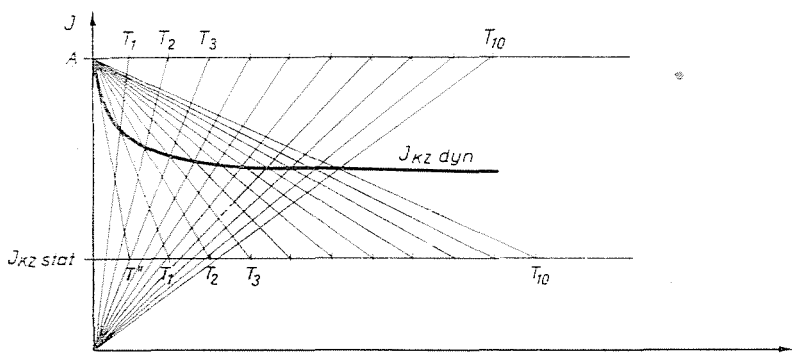


Abb. 9

b) $I_{kz\ dyn}$ kann vermindert werden, wenn c kleiner wird (da $d < 1$). Das ist entweder durch Herabsetzung von T'' , oder durch Vergrößerung von T erreichbar.

Durch Verminderung von U nimmt der statische Koeffizient S ab, was beim Schweißen zum Spritzen führt. Durch Vergrößerung von R' verschlechtert sich der Wirkungsgrad. Die Folgen einer Vergrößerung von T' der Zeitkonstante des Gleichstromkreises werden in Abb. 9 mittels eines Näherungsverfahrens gezeigt. Man sieht, daß mit der Vergrößerung von T , $I_{kz\ dyn}$ anfangs rasch abnimmt. Unter einem Wert von etwa $c = \frac{1}{3}$ ist aber diese Methode praktisch

unbrauchbar. Das Verfahren weist gleichzeitig auch darauf hin, warum die Schweiß Eigenschaften einer stark spritzenden Schweißmaschine nicht allein durch die Vergrößerung der Gleichstrominduktivität verbessert werden können.

Es bleibt also als der einzig richtige Weg, die Verminderung von T'' , also die Vergrößerung der Eingriffsgeschwindigkeit des Strombegrenzungsgliedes. Bei den Untersuchungen fanden wir, daß im Falle mechanischer Stromsteuerungen ($E1$ und $E4$ in Tabelle 2) der Wert von T'' praktisch vernachlässigt werden kann. Dadurch ergeben sich also kleine dynamische Kurz-

schlußströme, die sich dann »Nadel«-artig dämpfen. Bei Transduktoren-Steuerungen ist die Lage wegen großer Zeitkonstanten am ungünstigsten, aber auch hier kann behauptet werden, daß z. B. die in Reihe geschalteten Arbeitspulen günstiger als die parallel geschalteten sind. Die Lösungen *E* 5, *E* 6 und *E* 7 sind in transients Hinsicht praktisch gleichwertig und entsprechen gut den Forderungen. Type *E* 7 der in Ungarn hergestellt wird, weist z. B. sehr gute dynamische Verhältnisse, also gute Schweiß Eigenschaften auf.

B) Maschinen mit flacher Kennlinie

Die Technologie des CO₂ Schutzgasschweißens läßt sich in zwei Hauptgruppen unterteilen: Gruppe *a*) mit Sprühregenartigem Tropfenübergang, und *b*) mit Tropfenübergang unter Kurzschlußbildung. Die Forderungen sind für die zwei Gruppen verschieden. In Gruppe *a*) liegen die Spannungen zwischen 20—35 V, und die Maschinen arbeiten mit Strömen bis 600 A. In Gruppe *b*) dagegen liegen die Spannungen zwischen 15—25 V, und die Stromstärken erstrecken sich nur bis etwa 300 A. In dynamischer Beziehung sind die Forderungen im Fall *b*) viel strenger, da hier der Takt des Tropfenüberganges, die Temperatur des Schmelzbades, die Spritzerbildung, d. h. alle Hauptkennwerte, durch die elektrischen Eigenschaften bestimmt sind. Bei sprühregenartigem freiem Tropfenübergang kommen außer der Zündungszeit keine größeren Stromschwankungen vor. Hier ist die Induktivität des Gleichstromkreises für die Beurteilung weniger bestimmend.

Die dynamischen Eigenschaften wurden nach der Ersatzschaltung Abb. 10 untersucht. U_0 ist die theoretisch konstante Leerlaufspannung der Maschine, R_1 bzw. L bedeuten den Innenwiderstand bzw. die Induktivität, R_h den Widerstand des Kabels und des stromführenden Teiles der Elektrode. Die genormte Spannung, als Last der Maschine, ist durch U' und R_b ersetzt. Zur Untersuchung des Falles B) wird der Schalter K periodisch geschlossen, um aus dem Oszillogramm den Fall des Kurzschlusses mathematisch auszuwerten.

Abb. 11 zeigt den Verlauf des Stromes in Abb. a), die Spannung in b) und die Energie der Induktivität in c). Die Skizze gilt für das Kurzlichtbogen-Schweißen. Die aus Oszillogrammen bekannten Werte verhalten zur annähernden Bestimmung der erforderlichen Induktivität, deren Wert mit großer Genauigkeit in Betracht gezogen werden muß. Die Induktivität nimmt nämlich während der Kurzschlußperiode Energie auf, dämpft dadurch die Stromspitzen und liefert dafür im Augenblick t_1 eine Zündspannung zur Wiederezündung des Lichtbogens nach der Unterbrechung des Kurzschlusses.

Nachher wurde die Frage der erforderlichen Wärmemenge untersucht, die zum Abschmelzen des Tropfens im Kurzschluß notwendig ist, und durch den Ausdruck

$$\int_0^{t_1} I^2(t) \cdot R dt$$

beschrieben wird. Die Elektrode wird kurz nach Verlassen der stromleitenden Düse vorgewärmt, und bleibt dann in halb geschmolzenem Zustand bis zur Berührung mit dem Werkstoff. Mit dem Anwachsen des Kurzschlußstromes erfolgt einmal eine starke Erwärmung nach obigem Ausdruck und, zweitens, wächst die ebenfalls von der Stromstärke quadratisch abhängige Pinch-Kraft nach

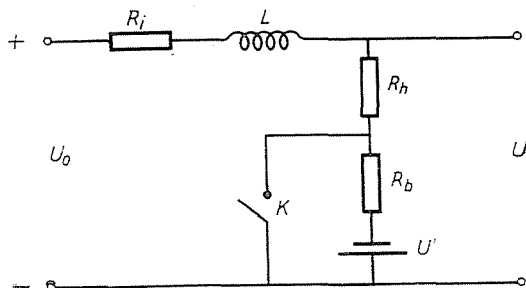


Abb. 10

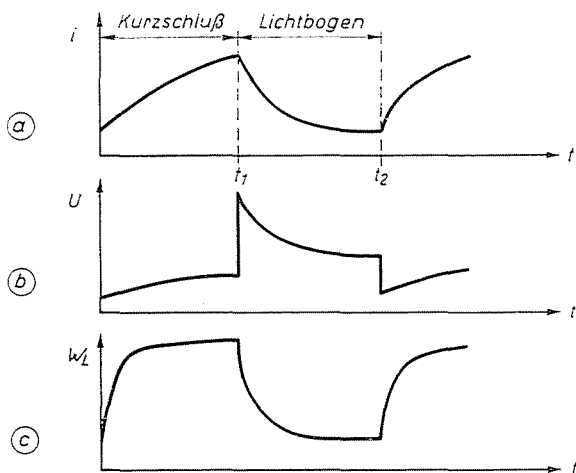


Abb. 11

Gl. (1). So ist es klar, daß bei einer zu kleinen Induktivität kalte Tropfen mit großen Spritzern in das Bad geraten, dagegen wird durch eine zu große Zeitkonstante im Gleichstromkreis die Kurzschlußperiode in die Länge gezogen, das Material bleibt kalt und die erforderliche Einbrandtiefe kann nicht erreicht werden.

Die rechnerische Erfassung der untersuchten Größen und Parameter ist an Hand den Ersatzschaltbildes in Abb. 10 kaum möglich, weil dieses Schema nur in einer sehr groben Annäherung gültig sein kann. Die Gleichstrominduktivität ist eben nicht konstant, der Elektrodenwiderstand stark temperaturabhängig, und die Güte des Schweißens ist außer den Konstruktionsmerkmalen

der Maschine noch von vielen anderen Faktoren abhängig. Es blieb daher der immer verläßliche Weg des Messens übrig. Fest steht zunächst nur, daß sich die Schweißgleichrichter für die Technologie des CO_2 -Schutzgasschweißens gut eignen, und daß die nahezu stufenlose oder feinstufige Steuerung der Gleichstrominduktivität unbedingt erforderlich ist.

Ein Meßgerät zur Beurteilung des Schweißgleichrichters

Bei einer Durchsicht der in diesem Aufsatz beschriebenen Untersuchungen wird es sofort klar, daß die Beurteilung einer Maschine am besten voll-

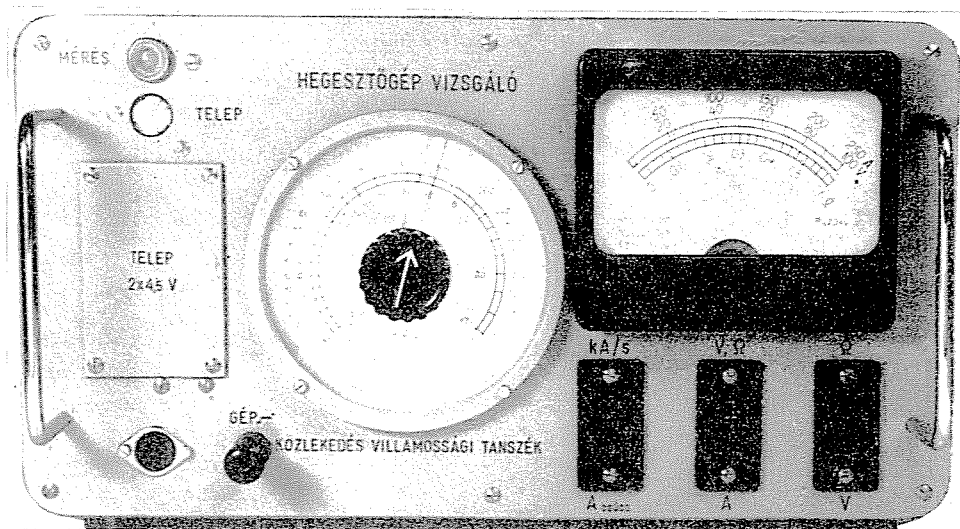


Abb. 12

ständig objektiv, d. h. allein durch Prüfen der Maschineneigenschaften (Parameter), ohne Aufnahme des Schweißprozesses, also von diesem unabhängig erfolgen muß. Die Messungen ergaben hauptsächlich dynamische Werte, die nur mit einem Oszillographen ermittelt werden konnten. Um diese mühsame Arbeit zu vermeiden, wurde am Lehrstuhl für Verkehrselektrotechnik der Technischen Universität Budapest ein Zweckinstrument entwickelt, mit dem die wichtigsten Parameter für die Qualifizierung rasch ermittelt werden können. Das Gerät (Abb. 12) ist zur Messung folgender statischer Kenngrößen geeignet: Leerlauf- und Arbeitsspannung, statischer Kurzschluß- und Schweißstrom. Zur Bestimmung der dynamischen Kenngrößen dient eine mit Transistoren ausgerüstete Schmidt-Trigger-Schaltung, die bei Erreichung einer — vorher durch ein Potenziometer eingestellten — Genauigkeitsgrenze kippt. Das

Kippen wird durch eine Lampe angezeigt; das Stromsignal wird durch einen speziellen Nebenschluß-Widerstand mit 3 einstellbaren Meßgrenzen geliefert. Die Bestimmung der Kenngröße geschieht stufenweise, bis die Kippgrenze erreicht ist, die durch das entsprechend geeichte Potenziometer unmittelbar in Amper angezeigt wird. Die Stromanstieggeschwindigkeit wird in derselben Schaltung gemessen, mit dem Unterschied, daß dieses Signal durch eine Differenzial-Drossel mit Ferrit-Kern geliefert wird, und daß die Ablesung an der $\frac{kA}{s}$ Skala des Potenziometers erfolgt.

Der Scheinwiderstand ist mit Hilfe eines anderen Potenziometers bestimmbar, das mit dem vorerwähnten Potenziometer auf einer gemeinsamen Achse angebracht ist. Wird auf die Klemmen dieses zweiten Potenziometers die Leerlaufspannung der untersuchten Maschine geschaltet, und das in das Gerät eingebaute Anzeigeelement die vom Wert des dynamischen Kurzschlußstromes abhängig eingestellte Bürste dieses Potenziometers geschaltet, zeigt der Zeiger das Verhältnis

$$\frac{U_0}{I_{kz \text{ dyn}}}.$$

Zum Gebrauch des Gerätes ist noch zu erwähnen, daß bei der Untersuchung von Maschinen mit flacher Kennlinie die Schaltung nach Abb. 7 benutzt wurde. Das Gerät ist tragbar, und mit Trockenbatterien ausgerüstet, deren Ladezustand mit Hilfe eines Sichtsignalgebers überwacht wird.

Zusammenfassung

In diesem Aufsatz wird über Forschungsergebnisse, die am Lehrstuhl für Verkehrselektrotechnik auf dem Gebiet der Beurteilung von Schweißgleichrichtern erzielt wurden, berichtet. Die Arbeit wurde mit der Untersuchung der Fehler begonnen, die bei den ersten Schweißgleichrichtern beobachtet wurden. Es konnte sofort festgestellt werden, daß die bisher üblichen Qualifizierungsmethoden den Anforderungen nicht entsprechen, und daß daher neue Wege eingeschlagen werden müssen. Dabei mußte auf das Spiel der Kräfte näher eingegangen werden, die auf den Schweißtropfen wirken, und nach Klärung der Verhältnisse wurden numerische Resultate erzielt, die sowohl die statischen, wie auch die dynamischen Eigenheiten der Maschine in Betracht ziehen. Nachher wurden einzelne übliche Typen untersucht und unter Anwendung der erhaltenen Resultate wurde festgestellt, in welchem Sinne die ausgearbeiteten Parameter die Schweißigenschaften der Maschine beeinflussen. An Hand der Ergebnisse werden für Neukonstruktionen gewisse Anweisungen gegeben. Schließlich wird kurz über ein Zweckinstrument, das am Lehrstuhl entwickelt wurde, sowie über dessen Funktionen und Prinzipien berichtet.

Literatur

1. KÖNIGSHOFER, TH.: Die Lichtbogen-Schweißmaschinen. Herbert Cram Verlag, Berlin 1955.
2. CARRER, A.: Nota sul comportamento dinamico delle macchine rotanti a corrente continua per saldatura ad arco. Rivista Italiana delle Saldatura 3—21, 169—175, 229—238 (1956).
3. WEINSCHENK, H.—WENDLER, H.: Kriterien der Schweißbeignung für Gleichstromschweißumformer. Zis. Mitt. 345—359 (1961).
4. WELLS, A.: A momentum principle for arc force. British Welding Journal 227—231 (1962).
5. HESSE, G.—EINICKE, H.: Neuerungen für den verstärkten Einsatz von Schweißgleichrichtern. Zis. Mitt. 55—70 (1967).

Dr. Károly KURUTZ, Budapest, IX., Kinizsi u. 1—7, Ungarn