

FREIBERGER
FORSCHUNGSHEFTE

B 54

METALLKUNDE

HANS-ERICH WEINSCHENK

**Beitrag zur Veränderung des Abschmelzcharakters
von ummantelten Elektroden durch den
elektrischen Anschlußkreis**

FFH
B54
d



AKADEMIE-VERLAG BERLIN

1960

XVI 1142^{B 54}_d

Bücherei
• Bergakademie •
Freiberg i. Sa.



FREIBERGER FORS
B 54

TU BERGAKADEMIE FREIBERG



XU XVI 1142 . B54D

FREIBERGER FORSCHUNGSHEFTE

Herausgegeben vom Rektor der Bergakademie Freiberg

B 54

METALLKUNDE

Beitrag zur Veränderung des Abschmelzcharakters
von ummantelten Elektroden
durch den elektrischen Anschlußkreis

Von

HANS-ERICH WEINSCHENK

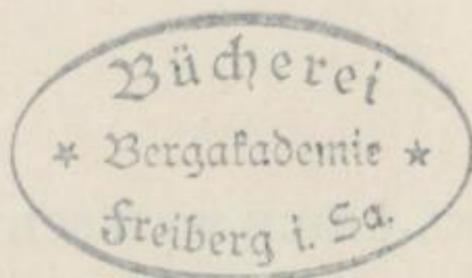


Akademie-Verlag · Berlin

Freib. Forsch.-H.	B 54	S. 1—76	54 Bilder	25 Tabellen	Berlin, Oktober 1960
-------------------	------	---------	-----------	-------------	----------------------

Bei der Bergakademie Freiberg
eingereichte und genehmigte Dissertation
zur Erlangung der Würde eines
Doktor rer. nat.

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. F. ERDMANN-JESNITZER, Freiberg
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. J. WRANA, Freiberg



1142 (B54) d

0

„Freiberger Forschungshefte“, Schriftenreihe für alle Gebiete der Montanwissenschaften. Herausgeber: Der Rektor der Bergakademie Freiberg, Prof. Dr.-Ing. habil. O. Oelsner. — Chefredakteur (kommissarisch): G. Läßker, Freiberg, Klubhaus der Bergakademie, Aug.-Bebel-Str. 5 (Fernruf 2497, Telex 057 8535). — Verlag: Akademie-Verlag GmbH, Berlin W 8, Leipziger Str. 3—4 (Fernruf 22 04 41, Telex 011 773), Postscheckkonto 35 021. — Die Freiberger Forschungshefte erscheinen in zwangloser Folge in den Reihen A, B, C und D. Ausführliches Verzeichnis aller lieferbaren Hefte von der Redaktion der Bergakademie oder dem Akademie-Verlag. — Preis dieses Heftes: 9,— DM. Bestell-Nr. 2062/B 54. Vertrieb: In der Deutschen Demokratischen Republik durch den Buchhandel; in Westdeutschland durch den Buchhandel (Auslieferung KUNST UND WISSEN, Erich Bieber, Stuttgart 8, Wilhelmstr. 4—6); im gesamten Ausland durch eine Importbuchhandlung, den Deutschen Buch-Export und -Import, GmbH, Leipzig C 1, Postschließfach 276, oder den Verlag. — Gesamtherstellung: Druckhaus: „Maxim Gorki“, Altenburg. — Lizenz-Nr. 200·100/640/60 — Printed in Germany.

Alle Rechte vorbehalten. ES 20 F 10.

(61. 2295)

Inhalt

Vorbetrachtungen	7
Überblick	7
Aufgabenstellung	10
Vorversuche	11
Auswahl und Kennzeichnung des Elektrodentyps	11
Definition der Bogenlänge für den Schweißlichtbogen mit abschmelzender Elektrode	17
Lösungswege	20
Hauptversuche	31
Meßmethode	31
Versuchs- und Meßanordnung	32
Versuchsplan	41
Versuchsdurchführung	41
Versuchsergebnisse	43
Auswertung und Diskussion der Versuchsergebnisse	58
Zusammenfassung und Ausblick	72
Literatur	74

Vorbetrachtungen

Überblick

Ein Verfahren, das heute in der Lichtbogenschweißtechnik den weitaus größten Anwendungsbereich gefunden hat, verdanken wir dem russischen Ingenieur SLAVIANOFF (1854—1897). Das nach ihm benannte SLAVIANOFF-Verfahren ist durch die Existenz eines Lichtbogens zwischen zwei Metallelektroden gekennzeichnet, wobei die eine Elektrode durch das Werkstück dargestellt wird. Der Zusatzwerkstoff — im folgenden als Elektrode bezeichnet — wird durch Umwandlung elektrischer Energie in Wärme geschmolzen. Sind Schweißstromstärke und Bogenlänge auf den Durchmesser und die chemisch-physikalische Beschaffenheit der Elektrode abgestimmt, so erfolgt eine Metallübertragung des geschmolzenen Elektrodenwerkstoffes auf das Werkstück.

Zahlreiche Arbeiten führten zu einer ersten, aber zum Teil noch außerordentlich lückenhaften Klärung der Materialübertragung. Ein Überblick über die grundlegenden Untersuchungen charakterisiert die Aufgabenstellung und Untersuchungsmethodik dieser Arbeiten und erscheint, insbesondere im Hinblick auf die meßtechnische Erfassung des Werkstoffüberganges, für die vorliegende Problemstellung von Bedeutung.

Wird nach dem SLAVIANOFF-Verfahren geschweißt, so bewirken der Lichtbogen zwischen den beiden Metallelektroden und die Widerstandserwärmung in der Elektrode die Umwandlung elektrischer Energie in Wärme.

WACLAWIK [1] kennzeichnete näherungsweise für die Handschweißung den Anteil der Widerstandswärme für das Abschmelzen der Elektrode. Analoge Betrachtungen, die sich auf automatische Schweißverfahren ausdehnen, führte RYKALIN [2] durch. Beide Autoren zeigen für kleine Stromdichten den geringen Einfluß der Widerstandserwärmung auf das Abschmelzen einer Elektrode. Der Anteil der Widerstandserwärmung beim Abschmelzprozeß ist in erster Linie von der Schweißstromdichte und dem Schweißverfahren abhängig. Den weitaus entscheidenden Anteil beim Abschmelzen der Elektrode gewinnt jedoch die Nutzleistung des Lichtbogens.

Während über den Ablauf des Materialtransportes in der Bogenstrecke, insbesondere durch Arbeiten in neuerer Zeit, verhältnismäßig klare Vorstellungen entstanden, sind die Ursachen, die zur Materialübertragung auf das Werkstück führen, noch ungeklärt, weshalb auch eine Steuerung des Werkstoffüberganges so außerordentlich schwierig ist. Zunächst vertrat man die Ansicht, daß die Werkstoffübertragung durch einen Verdampfungs- und Sublimationsvorgang erfolgt, da Untersuchungen über den Hochstrommetalllichtbogen fehlten [3]. SEELIGER und WULFHECKEL [4] untersuchten die Werkstoffübertragung bei einem Gleichstromlichtbogen von 0,5 bis 4 A zwischen einer ungekühlten Eisenelektrode von 4 mm Durchmesser und einer gekühlten Kupfer-

anode in Luft. Sie fanden einen kathodenseitigen Werkstoffabbau von etwa $50 \mu\text{g}/\text{As}$. HOLM, GÜLDENPFENNIG und STÖRMER [5] ermittelten mit einem kurzzeitigen Abreißbogen von $< 5 \text{ A}$ Anfangsstrom zwischen Eisenelektroden in Stickstoffatmosphäre bei Atmosphärendruck den durch Verdampfung entstandenen Werkstoffabbau zu etwa $50 \mu\text{g}/\text{As}$. COMPTON und VAN VOORHIS [6] vermuteten bereits, daß die Werkstoffübertragung nicht nur durch Verdampfung, sondern größtenteils durch ausgetretene flüssige Metallmengen (Tropfen) aus der Elektrode erfolgt. Die Anwendung der oszillographischen und kinematographischen Untersuchungsmethode zur Erforschung der Vorgänge im Schweißlichtbogen bestätigte später diese Vermutung und zeigte, daß der Materialtransport durch das Abfließen des aufgeschmolzenen Werkstoffes vom Elektrodenende in das darunter befindliche flüssige Schmelzbad erfolgt. Systematische Messungen des beim Schweißen in waagerechter Position übergehenden Elektrodenmaterials wurden zuerst von LEFRING [7] für Elektroden von 2 bis 5 mm Durchmesser bei Schweißstromstärken zwischen 50 und 200 A zu etwa 2 bis 3 mg/As ermittelt.

Es ist vom Elektrodentyp, der Bogenlänge und der Stromdichte abhängig, ob die Materialübertragung auf das Werkstück unter Kurzschlußbildung erfolgt oder nicht. BUNG [8] registrierte oszillographisch die Strom-Spannungswerte beim Verschweißen verschiedener Elektrodentypen und gab an Hand der Schweißoszillogramme eine Gegenüberstellung der sich hierbei ergebenden charakteristischen Unterschiede, die jedoch für eine Unterteilung der Elektrodentypen hinsichtlich ihres Abschmelzcharakters ungenügend ist. PFLUG und SEELIGER [9] untersuchten oszillographisch und mit einem nicht näher beschriebenen Registriergerät den Werkstoffübergang im Schweißlichtbogen und ermittelten u. a. das mittlere Tropfengewicht für Nacktdrahtelektroden. Das mittlere Tropfengewicht ist für einen vorgegebenen Elektrodentyp und eine konstante Schweißstromstärke in erster Linie von der Bogenlänge abhängig, für die als äquivalente Vergleichsgröße die Spannung benutzt wurde. Eine andere Methode zur Bestimmung des Tropfengewichtes wendeten DOAN [10] und PATON [11] an. Sie führten mit sehr hoher Schweißgeschwindigkeit Auftragsschweißungen durch und trennten dadurch die in der Bogenstrecke übergehenden Metalltropfen voneinander. MCMASTER, MARTIN und LEATHERMAN [12] charakterisierten den Werkstoffübergang durch Registrierung der Kurzschlußanzahl pro Längeneinheit der Elektrode mit Hilfe eines röhrenlosen Gerätes. Auch sie wählten die Schweißspannung als Bezugsgröße für das Tropfengewicht.

Als sehr fruchtbringend und ergänzend zu diesen Versuchen hat sich das kinematographische Verfahren zur Untersuchung der Vorgänge im Schweißlichtbogen erwiesen. Die von HUDSON [13] durchgeführten Zeitlupenaufnahmen mit einer Bildfrequenz von 32 Bildern/s gaben zunächst noch infolge der angewandten Aufnahmetechnik und der zu geringen Zeitdehnung einen unzureichenden Einblick in die Verhältnisse bei der Werkstoffübertragung. BUNG [14] beschreibt kurz die von der amerikanischen Gesellschaft „The Fusion Welding Co.“ aufgenommenen Zeitlupenfilme, die nur auf ultrarote Strahlen reagieren, und findet eine Bestätigung für die Deutung seiner Schweißoszillogramme. HILPERT und THUN [15] ermöglichten mit einer Bildfrequenz von 2000 Bildern/s durch das Schattenbildverfahren erstmalig einen Einblick in die Bewegungsphasen des aufgeschmolzenen Elektrodenwerkstoffes, seine Übertragung auf das Werkstück sowie die Ausbildungsform des Lichtbogens. In den nachfolgenden

Jahren bediente man sich dann sehr häufig der Zeitlupentechnik, um den Werkstoffübergang mit Hilfe des Schattenbildverfahrens zu erforschen [16, 17, 18]. ERDMANN-JESNITZER [19] steigerte durch verbesserte Aufnahmetechnik und Anwendung von Farbfilmern wesentlich die Schärfe und Kontrastwirkung und nahm eine lupenmäßige Einzelauswertung der Filme vor, die zu einer grundlegenden Beschreibung des Abschmelzcharakters der wichtigsten handelsüblichen Elektrodentypen führte.

Parallel zu den Untersuchungen, die Größe und Gewicht des übertragenen Werkstoffes charakterisieren, entstand eine Reihe von Arbeiten, die sich, hauptsächlich ausgelöst durch die Überkopfschweißung, mit den Ursachen der Ablösung des an der Elektroden spitze verflüssigten Materials auseinandersetzen. FLAMM [20] nahm an, daß der Materialtransport wesentlich durch die Oberflächenspannung und damit durch die Gestalt des flüssigen Elektrodenwerkstoffes bestimmt wird. CREEDY und Mitarbeiter [21] schrieben dem Pinch-Effekt die größte Bedeutung für die Übertragung des an der Elektroden spitze verflüssigten Werkstoffes zu. Die bereits von DOAN [22] vertretene Ansicht, daß gelöste Gase bzw. überhitzter Dampf unter der flüssigen Oberfläche für das Ausschleudern von Tropfen verantwortlich sind, wird durch PATZKEWITSCH [23] wieder aufgegriffen. Nach seiner heute allgemein vorherrschenden Meinung in der SU wird der Werkstoffübergang durch eine Druckkraft ausgelöst, die durch Ausscheidung von Kohlenoxyd aus dem flüssigen Tropfen entsteht. Diese im Schweißlichtbogen in Richtung der Elektrodenachse auftretende resultierende Druckkraft wurde von NIEBURG [24] in Abhängigkeit von Stromstärke, Elektrodentyp und Polung gemessen. Die Kraft beträgt bei richtiger Polung einer Elektrode von 4 mm Durchmesser und einer ihr zugeordneten Stromstärke von 150 bis 180 A etwa 1 g bei einer Brenndauer des Bogens von 1 s. ERDMANN-JESNITZER und PRIMKE [25] ermittelten für die in axialer Richtung der Elektrode auftretende Kraft einen geringeren Wert, der nach Einstellung des Gleichgewichtszustandes in der Bogenstrecke gemessen ist. VON ENGEL [26], NIEBURG [24], VON CONRADY [27], SACK [16, 28], LE COMPTE und RÖLL [29], SONDEREGGER [30] und LORENZ [31] nehmen eine Abschätzung und Gegenüberstellung einzelner Komponenten, die zur resultierenden Druckkraft führen, vor, gelangen jedoch zu keiner einheitlichen und endgültigen Auffassung.

Nach diesen vorliegenden Arbeiten haben jedoch einen wesentlichen Anteil an der in Richtung der Elektrodenachse wirkenden Druckkraft

1. die Kraftwirkung durch Verdampfung der Elektrodenkern- und Umhüllungswerkstoffe,
2. die Oberflächenspannung des schmelzflüssigen Materials,
3. die Schwerkraft,
4. der Pinch-Effekt.

Während die ersten beiden Komponenten hauptsächlich durch den Elektrodenentwickler bestimmt werden, ist die Einwirkung der Schwerkraft auf den Werkstoffübergang von der Schweißposition abhängig. Der Pinch-Effekt gewinnt besonders beim Werkstoffübergang, der unter Kurzschlußbildung erfolgt, einen Einfluß und ist vom Schweißkreis, d. h. von der Stromquelle und der Schaltungsart sowie der Dimensionierung des elektrischen Anschlußkreises, abhängig.

Aufgabenstellung

Jeder Elektrodentyp besitzt einen ihm eigenen charakteristischen Abschmelzverlauf. Dieser Abschmelzcharakter wird durch die Zusammensetzung des Kerndrahtes und der Elektrodenumhüllung sowie durch die Schweißstromdichte, die Bogenlänge und die Polung der Elektrode bestimmt. Die Steuerung des Abschmelzcharakters geschieht in der Schweißtechnik rein empirisch. Es sind keine Arbeiten bekannt, die nach Möglichkeiten suchen, diesen Abschmelzcharakter systematisch zu beeinflussen oder den durch die Empirie erzielten Effekt unter normalen Schweißbedingungen (s. S. 11) quantitativ zu erfassen.

Der z. Z. übliche Weg zur Veränderung des Abschmelzcharakters von Elektroden bei ein und demselben Kerndraht ist durch die Hüllentechnik gegeben. Durch bestimmte Hüllenrezepturen wird ein groß-, mittel- und feintropfiger Abschmelzcharakter erreicht, eine Klassifizierung, die bisher in der Literatur nicht definiert ist und die auf Grund visueller Beobachtungen aufgestellt wurde. Dieser Abschmelzcharakter kann das Produkt eines durch die Hüllentechnik angestrebten Tropfencharakters sein, er ist jedoch in den meisten Fällen die Folgeerscheinung einer nach metallurgischen Gesichtspunkten zusammengesetzten Umhüllung unter Berücksichtigung einer hinreichenden Bogenstabilität. So zeigen nackte, schwach getauchte und dünn umhüllte Elektroden einen groß- bis mitteltropfigen Abschmelzcharakter, während dick umhüllte Elektroden durchweg einen feintropfigen bis sprühregenartigen Abschmelzcharakter liefern.

Der bisher übliche Weg zur Steuerung des Abschmelzcharakters von ummantelten Elektroden durch die Hüllentechnik fordert eine große Anzahl von Elektrodentypen. Soll unter Einhaltung der maximalen Abschmelzgeschwindigkeit eine Elektrode in ihrem Abschmelzcharakter unterschiedlich gestaltet werden, so werden hierfür in ihrem Aufbau unterschiedliche Elektrodentypen benötigt. Im Hinblick auf eine Verminderung der Elektrodentypenzahl entstand die Aufgabenstellung, den Abschmelzcharakter von ummantelten Elektroden unter Umgehung der Hüllentechnik durch den elektrischen Anschlußkreis zu verändern. Hierbei ist es unerlässlich, die Problemstellung so zu spezialisieren, daß nur die Veränderung des Abschmelzcharakters erfaßt wird, und alle Reaktionen metallurgischer Art, die hiermit verknüpft sind, unbeachtet zu lassen, obgleich letztere einen maßgebenden Einfluß auf den Schweißprozeß gewinnen. Besondere Bedeutung erhält diese Problemstellung für automatische Schweißverfahren (UP- und CO₂-Schweißung), die mit nacktem Zusatzdraht arbeiten.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, experimentell zu untersuchen, ob neben den bisherigen Lösungswegen, die eine Veränderung des Abschmelzcharakters gestatten, auch eine Beeinflussung des Abschmelzverlaufes durch den elektrischen Anschlußkreis erreicht werden kann. Die Untersuchungen sind mit der Gleichstromschweißung unter Verwendung einer handelsüblichen Elektrodentype, deren Werkstoffübergang unter Kurzschlußbildung erfolgt, durchzuführen. Es ist eine Meßmethode zu entwickeln, die eine Veränderung des Abschmelzcharakters quantitativ erfaßt und es gestattet, die Grenzen der Beeinflussbarkeit festzulegen. Hierbei sind die Schweißparameter herauszustellen, in deren Abhängigkeit sich der Abschmelzcharakter unter Berücksichtigung des elektrischen Anschlußkreises ändert. Aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen ist eine Arbeitshypothese zu entwickeln, die eine Erklärung für das zu erwartende unterschiedliche Abschmelzverhalten der untersuchten Elektrode gestattet.

Vorversuche

Auswahl und Kennzeichnung des Elektrodentyps

Der Werkstoffübergang von ummantelten Elektroden kann von einem elektrischen Kurzschluß begleitet sein oder auch nicht, eine Erscheinung, die bei Einhaltung normaler Schweißbedingungen, wie höchstzulässiger Schweißstromdichte und richtiger Bogenlänge, vom Elektrodentyp abhängig ist. Aus einer Anzahl handelsüblicher Elektrodentypen, deren Werkstoffübergang unter Kurzschlußbildung erfolgt, wurde nach oszillographisch durchgeführten Vorversuchen eine mittelstark umhüllte Elektrode auf Titandioxydbasis ausgewählt.

Elektrodentyp Ti VII m: Kerndrahtdurchmesser 4 mm, Gesamtdurchmesser 5,2 mm, Länge 350 mm.

Als Richtanalyse für das Schweißgut dieses Elektrodentyps wird angegeben:

C	%	0,06 bis 0,11,
Si	%	0,12 bis 0,22,
Mn	%	0,40 bis 0,60,
N ₂	%	0,02 bis 0,04,
O ₂	%	0,11 bis 0,14,
H ₂	(cm ³ je 100 g Schweißgut)	6,0 bis 8,5.

Der Abschmelzcharakter dieses Elektrodentyps wird allgemein als mittel- bis grobtropfig bezeichnet. Die Materialübertragung findet während des Tropfenkurzschlusses statt. Das Intervall, in dem die Schweißstromstärke und Bogenlänge geregelt werden kann, ohne daß ein wesentlicher Anteil der Materialübertragung in Form kurzschlußfreier Tropfen erfolgt, ist speziell bei diesem Elektrodentyp groß, weshalb sie für die Versuchsdurchführung besonders geeignet ist. Außerdem neigt der Elektrodentyp sehr leicht dazu, seinen Abschmelzcharakter in Abhängigkeit der Schweißstromstärke zu ändern. Diese Erkenntnisse wurden bei oszillographisch und filmisch durchgeführten Vorversuchen gewonnen. Die Vorversuche dienten gleichzeitig dazu, das oszillographische und kinematographische Meßverfahren auf die Eignung für vorliegende Untersuchungen zu überprüfen. Die Versuchsanordnung hierfür gibt Bild 1 wieder. Der Schweißstrom wird von einem KJELLBERG-Gleichstrom-Schweißumformer Typ KW 500 geliefert. Den Schaltplan des Schweißgenerators zeigt Bild 2. Die fallenden Strom-Spannungskennlinien (Bild 3) werden im Regelbereich F_1 durch Ankerrückwirkung und im Regelbereich F_2 durch Ankerrückwirkung und Gegenkompondierung erreicht. Der Schweißkreis enthält zur Messung der Strom-Spannungswerte Instrumente mit Thermoumformern. Nur die Anwendung derartiger Instrumente ermöglicht es, trotz

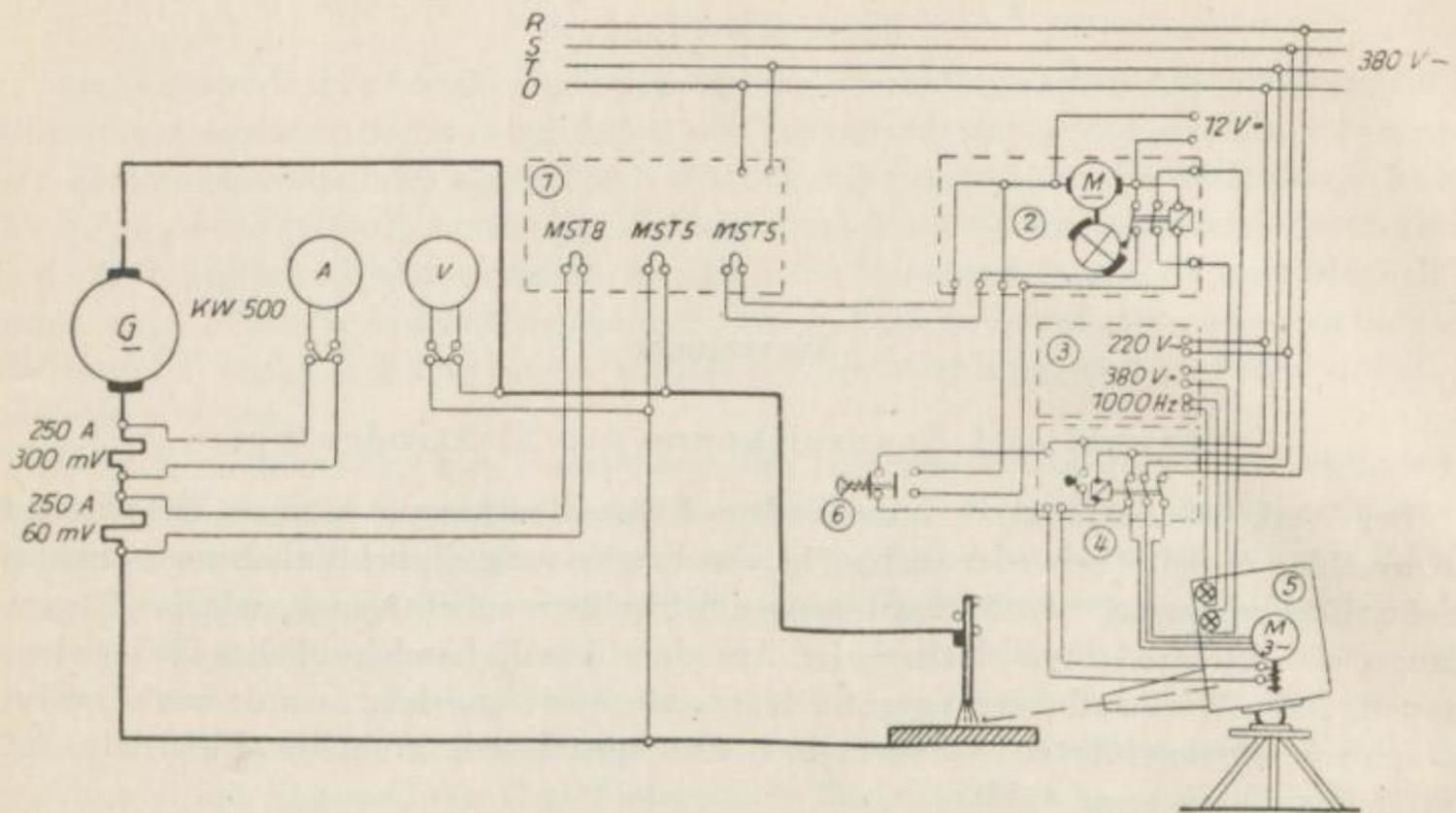


Bild 1. Versuchsanordnung für Vorversuche

1 3-Schleifenoszillograph; 2 Impulsgeber; 3 Zeitmarkengeber; 4 Schaltpult;
5 Zeitlupenkamera; 6 Drucktaste

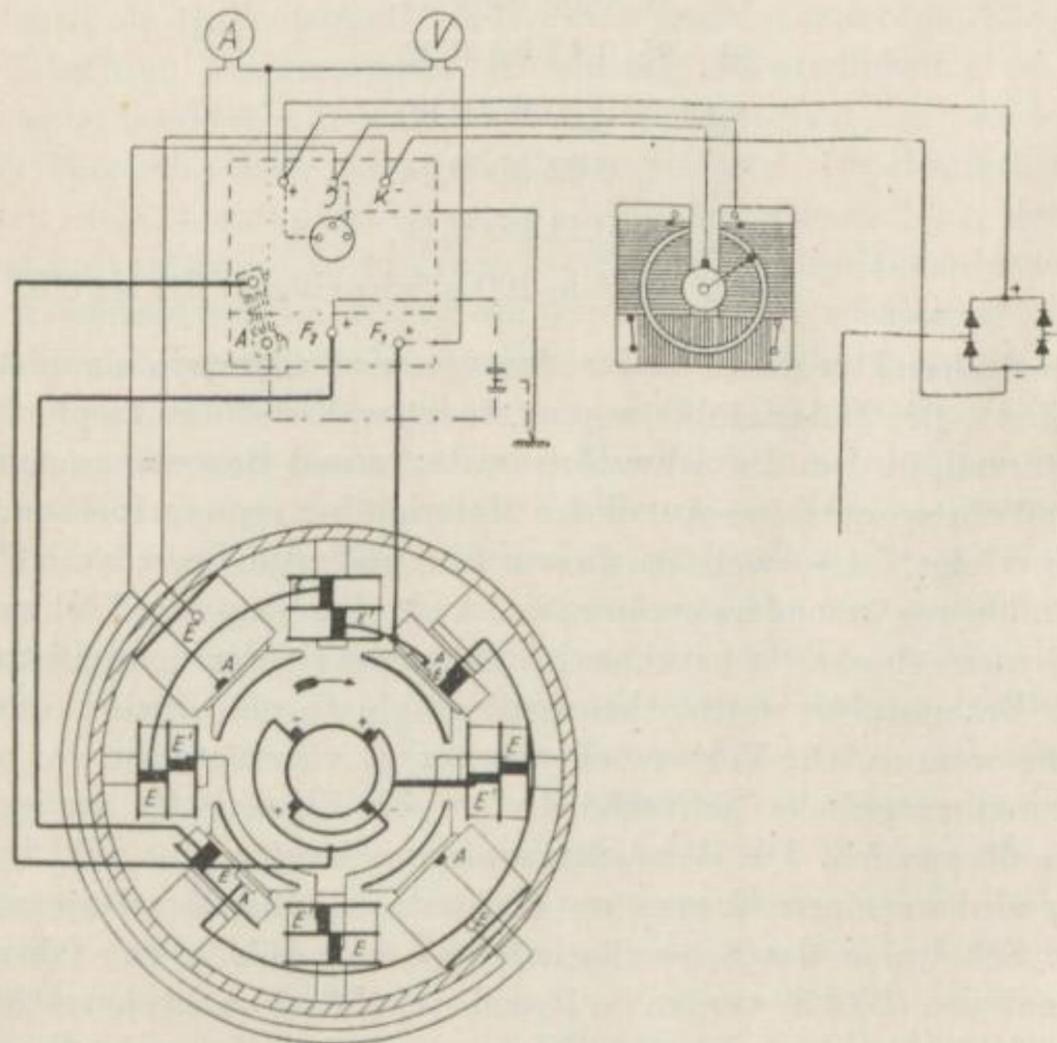


Bild 2. Schaltplan des KJELLBERG-Schweißgenerators vom Typ KW 500; Nr. 54577;
45/95 V_{leer}; 1450 U/min; Regul. 15/45 V; 55/550 A; 70% ED 45 V 500 A; Baujahr 1939

der Diskontinuität des Werkstoffüberganges reproduzierbare Strom-Spannungswerte einzustellen. Eine weitere Vorbedingung für reproduzierbare und auswertbare Versuchsreihen ist die Automatisierung des Elektrodenvorschubs und der Schweißgeschwindigkeit. Der Elektrodenvorschub wird durch einen KJELLBERG-Schweißautomaten vom Typ S I (Schaltplan s. Bild 4) und die Schweißgeschwindigkeit durch einen speziell für die Versuchsdurchführung gebauten Schweißwagen, der eine Einspannvorrichtung

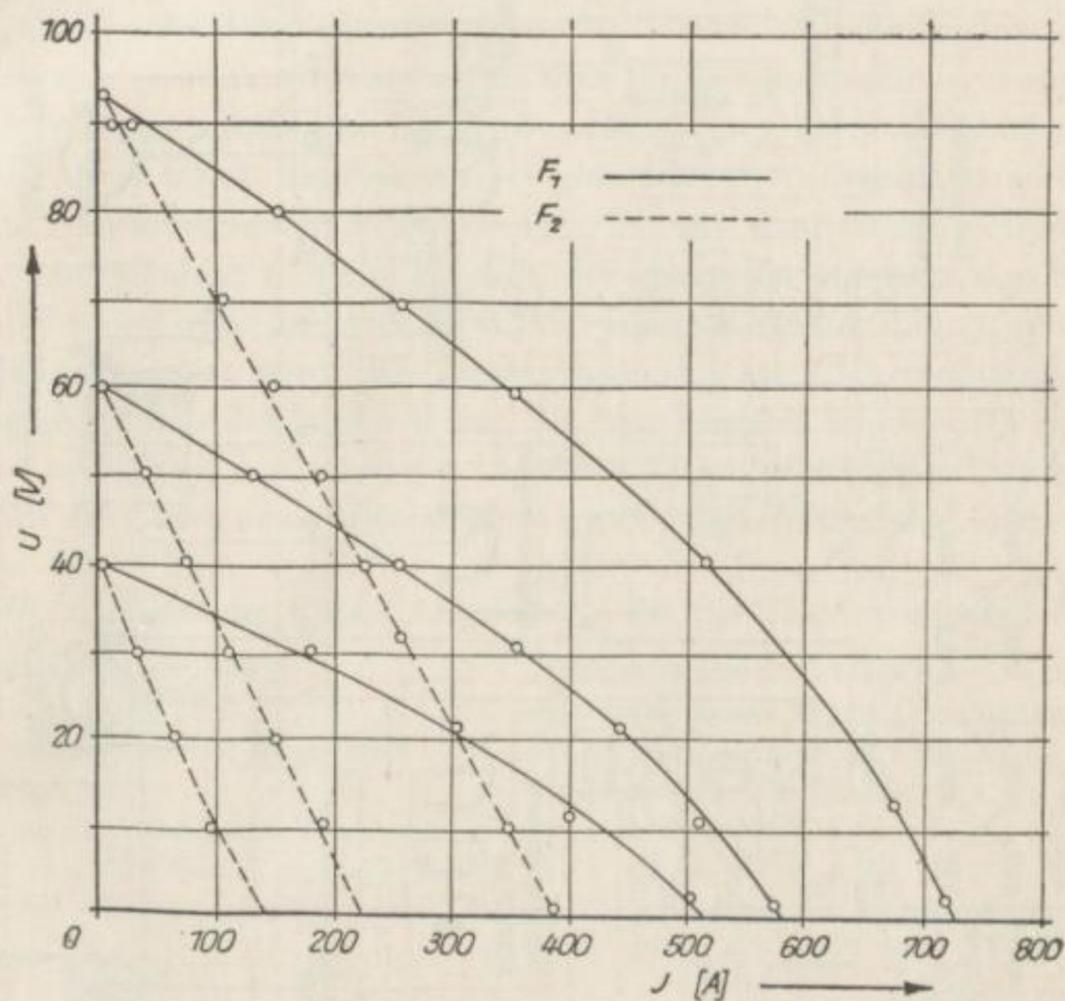


Bild 3. Statische Kennlinien KW 500

für das Werkstück enthält, konstant gehalten. Die Einspannvorrichtung ist so ausgebildet, daß das Werkstück stets horizontal zur senkrecht stehenden Elektrode geführt wird und der Anschluß des Schweißkabels die Blaswirkung des Lichtbogens auf ein Minimum beschränkt.

Die Erfassung des Abschmelzcharakters geschieht durch Oszillographieren der Strom-Spannungswerte beim Schweißen und mit Hilfe einer Zeitlupenkamera. Beide Registriergeräte sind durch einen Zeitmarkengeber 3 miteinander gekoppelt. Die Aufnahmetechnik ist folgende:

Nach Zünden des Lichtbogens und Einstellung der gewünschten Schweißparameter wird mit der oszillographischen Registrierung der Strom-Spannungswerte begonnen und der Kameramotor durch Betätigung einer Drucktaste am Schaltpult 4 eingeschaltet. Dann wird die Drucktaste 6 betätigt und durch eine Magnetkupplung der Filmtransport ausgelöst. Nach Beendigung des Filmschlupfes wird durch weiteres Drücken der Taste 6 ein Impuls auf den Film und das Oszillogramm gegeben, solange die Kontakte der Taste geschlossen sind. Das Aufsuchen dieser Impulse führt zu einer eindeutigen Zu-

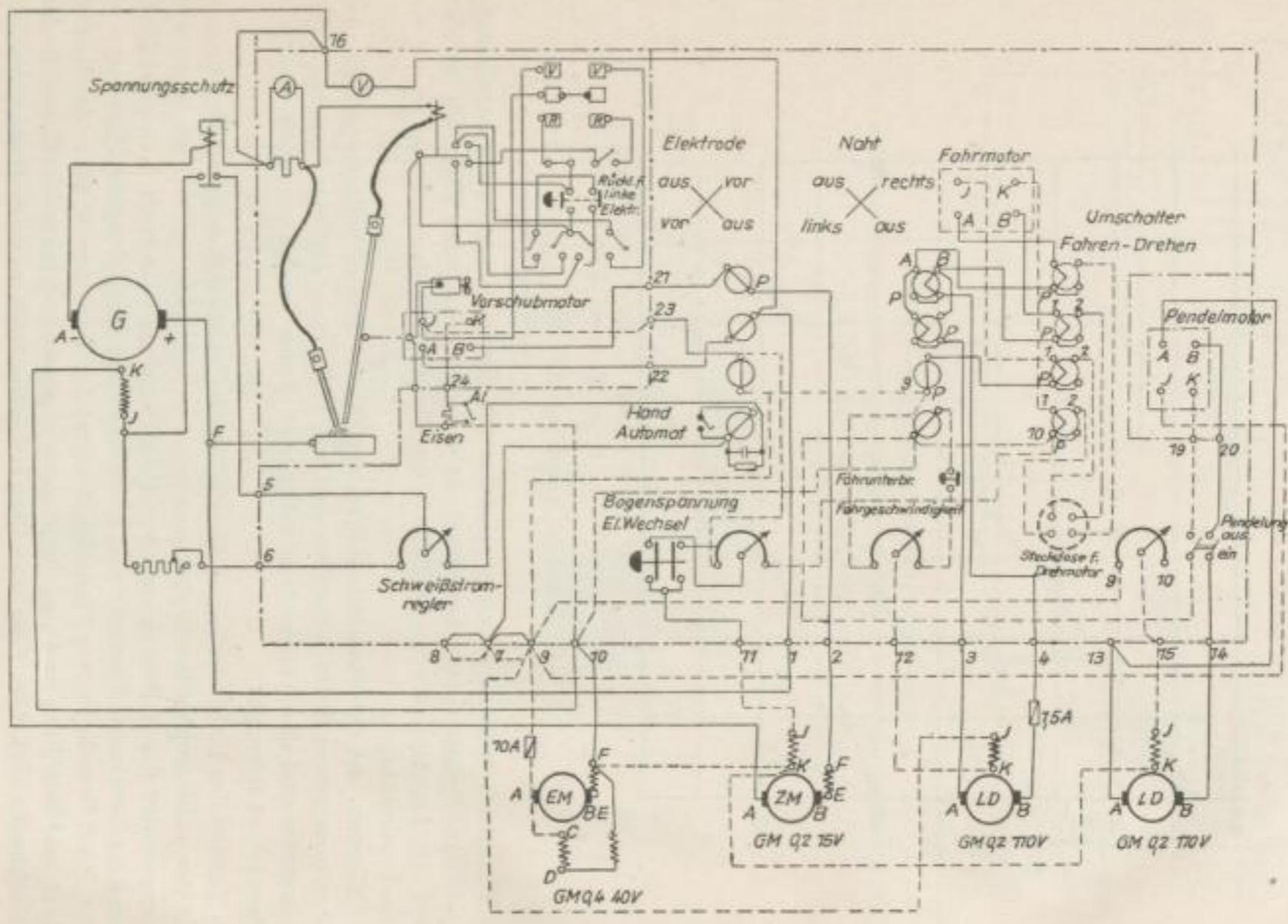


Bild 4. Schaltplan des KJELLBERG-Schweißautomaten vom Typ S I

ordnung von Film und Oszillogramm. Durch Auszählen von Zeitmarken, die zusätzlich auf dem Film (1000 Hz) und dem Oszillogramm (500 Hz) erscheinen, kann jedem Bild des Zeitlupenfilms der entsprechende Strom-Spannungsverlauf gegenübergestellt werden. Zur Erfassung des Abschmelzcharakters wurden Auftragschweißungen auf Blechen (280 × 120 × 18 mm) der Qualität MSt 3b ausgeführt. Hierbei wurde die Bogen-

länge l_0 (s. S. 17 bis 20) im Hinblick auf die Durchführung der Hauptversuche geändert. Die oszillographische und filmische Registrierung des Abschmelzcharakters erfolgte, nachdem zur Einstellung der Schweißparameter 40 mm Elektrodenlänge verschweißt waren. Schweißparameter und Aufnahmebedingungen sind den Tabellen 1 bis 3 zu entnehmen.

Die Auswertung des kombinierten Meßverfahrens ergibt folgendes Bild: Der Werkstoffübergang erfolgt in einzelnen periodisch aufeinanderfolgenden Tropfen unter Kurzschlußbildung. Die Bezeichnung „Tropfen“ ist in Anlehnung an die schweißtechnische Literatur gewählt und sagt nichts über die Gestalt des übergehenden schmelzflüssigen Elektrodenmaterials aus. Die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Kurzschlüssen wird als Heizzeit, die Zeit vom Beginn bis zur Aufhebung des Kurzschlusses als Kurzschlußzeit bezeichnet. Während der Heizzeit wird das Elektrodenende aufgeschmolzen, und es bildet sich ein Tropfen, der ganz oder teilweise von Schlacke eingehüllt ist und dessen Größe und Ausbildungsform durch die Bogenlänge und seine Oberflächenspannung begrenzt wird. Die Bewegungen des am Elektrodenende hängenden schmelzflüssigen Werkstoffes folgen keiner Gesetzmäßigkeit und werden in erster Linie durch die Viskosität der Schlacke, die Lage des Lichtbogenfußpunktes und die Ausbildung des um die Elektrode vorhandenen elektromagnetischen Feldes bestimmt. Das

Tabelle 1. Werte der Kurzschlußzeiten t_{K_i} und der Tropfenvolumina V_{Tr_i}

Schweißstromstärke $J_s = 160$ A

Schweißspannung $U_s = 20$ V

Schweißgeschwindigkeit $v = 20$ cm/min

Abschmelzzeit $t_s = 2,6$ s

Abschmelzgeschwindigkeit $w = 0,43$ cm/s

Kurzschlußanzahl aus Oszillogramm $n_{Osz} = 80$

Kurzschlußanzahl aus Film $n_{Film} = 42$

Bildfrequenz 750 Bilder/s

Lfd. Nr.	t_{K_i} [10^{-3} s]	V_{Tr_i} [mm^3]	Lfd. Nr.	t_{K_i} [10^{-3} s]	V_{Tr_i} [mm^3]
1	17,0	26,0	22	3,0	2,5
2	14,0	25,0	23	2,5	4,5
3	12,5	27,5	24	2,0	4,0
4	11,5	12,5	25	2,0	4,0
5	11,0	17,5	26	2,0	—
6	11,0	16,0	27	1,5	—
7	10,5	13,0	28	1,5	—
8	10,0	15,0	29	1,5	—
9	10,0	14,0	30	1,5	—
10	9,5	21,5	31	1,5	—
11	9,0	8,0	32	1,5	—
12	9,0	7,5	33	1,5	—
13	9,0	6,5	34	1,5	—
14	6,5	21,0	35	1,5	—
15	5,0	9,0	36	1,5	—
16	4,0	11,0	37	1,0	—
17	4,0	4,0	38	1,0	—
18	3,5	8,5	39	1,0	—
19	3,5	4,5	40	1,0	—
20	3,5	1,5	41	0,5	—
21	3,0	4,5	42	0,5	—

$$\sum V_{Tr_i} = V_M = 289 \text{ mm}^3 > V'_M = 238 \text{ mm}^3$$

Tabelle 2. Werte der Kurzschlußzeiten t_{K_i} und der Tropfenvolumina V_{Tr_i}

Schweißstromstärke $J_s = 160$ A
 Schweißspannung $U_s = 21$ V
 Schweißgeschwindigkeit $v = 20$ cm/min
 Abschmelzzeit $t_s = 2,6$ s

Abschmelzgeschwindigkeit $w = 0,37$ cm/s
 Kurzschlußanzahl aus Oszillogramm $n_{Osz} = 40$
 Kurzschlußanzahl aus Film $n_{Film} = 26$
 Bildfrequenz 750 Bilder/s

Lfd. Nr.	t_{K_i} [10^{-3} s]	V_{Tr_i} [mm^3]	Lfd. Nr.	t_{K_i} [10^{-3} s]	V_{Tr_i} [mm^3]
1	22,0	36,0	14	1,5	5,0
2	20,0	59,0	15	1,5	2,5
3	17,5	40,0	16	1,5	2,0
4	16,5	62,0	17	1,5	1,5
5	12,5	52,5	18	1,0	2,0
6	12,5	34,5	19	1,0	1,5
7	11,0	28,0	20	1,0	1,5
8	5,0	14,5	21	1,0	1,0
9	5,0	9,0	22	1,0	1,0
10	3,0	22,5	23	1,0	1,0
11	2,5	6,0	24	1,0	1,0
12	2,0	6,0	25	0,5	2,0
13	2,0	2,0	26	0,5	1,0

$$\sum V_{Tr_i} = V_M = 395 \text{ mm}^3 > V'_M = 205 \text{ mm}^3$$

Tabelle 3. Werte der Kurzschlußzeiten t_{K_i} und der Tropfenvolumina V_{Tr_i}

Schweißstromstärke $J_s = 160$ A
 Schweißspannung $U_s = 22$ V
 Schweißgeschwindigkeit $v = 20$ cm/min
 Abschmelzzeit $t_s = 2,6$ s

Abschmelzgeschwindigkeit $w = 0,36$ cm/s
 Kurzschlußanzahl aus Oszillogramm $n_{Osz} = 36$
 Kurzschlußanzahl aus Film $n_{Film} = 7$
 Bildfrequenz 750 Bilder/s

Lfd. Nr.	t_{K_i} [10^{-3} s]	V_{Tr_i} [mm^3]
1	18,5	53,0
2	16,5	69,0
3	16,5	68,5
4	16,0	75,5
5	15,0	67,0
6	11,5	26,5
7	11,0	20,5

$$\sum V_{Tr_i} = V_M = 380 \text{ mm}^3 > V'_M = 200 \text{ mm}^3$$

Schmelzbad auf dem Werkstück führt ebenfalls Bewegungen aus, die keiner Gesetzmäßigkeit unterliegen. Die Auswertung der Zeitlupenfilme zeigt deutlich, daß der elektrische Kurzschluß im Schweißkreis und damit der Werkstoffübergang durch eine Berührung des am Elektrodenende hängenden Tropfens mit dem schmelzflüssigen Teil des Werkstückes ausgelöst wird. Das hierbei übergehende Materialvolumen ist unter Berücksichtigung des elektrischen Anschlußkreises vom ersten sich zufällig einstellenden Berührungsquerschnitt abhängig und von der Bereitschaft der beiden Schmelzoberflächen, sich zu vereinigen. Die Oberflächenspannung und ihre Tendenz, die geringste Oberfläche einzunehmen, führt zur Ausbildung einer massiven Kurzschlußbrücke, die durch den Pinch-Effekt eine einschnürende Wirkung erfährt. Durch die damit verknüpfte

Querschnittsverminderung gewinnt die Wärmewirkung des Stromes einen zunehmenden Einfluß und führt zum Durchschmelzen der Werkstoffbrücke. Dieser letzte Vorgang, der explosionsartig erfolgt, leitet die Neuzündung des Lichtbogens ein und ist der Beginn einer neuen Heizperiode.

Für eine quantitative Erfassung des Abschmelzcharakters erfolgte die Einzelauswertung einiger Zeitlupenfilme und der hierzu aufgenommenen Oszillogramme. Die vom Schmelzbad aufgenommenen Materialvolumina wurden den Zeitlupenfilmen, die entsprechenden Kurzschlußzeiten den Oszillogrammen entnommen. Das übertragene Materialvolumen während des Tropfenkurzschlusses wurde näherungsweise ermittelt. Hierfür wurde das für den Werkstoffübergang unmittelbar vor dem Tropfenkurzschluß zur Verfügung stehende Materialvolumen und das unmittelbar nach Tropfenabriß am Elektrodenende verbleibende Restvolumen bestimmt. Eine so durchgeführte Auswertung ließ während der Kurzschlußzeiten, die $\leq 1,5$ ms sind, in den meisten Fällen keinen Werkstoffübergang erkennen. Der oszillographisch registrierte Spannungsverlauf zeigte jedoch auch für Zeiten, die $\leq 1,5$ ms liegen, einen Kurzschluß. Entsprechend der Schweißspannung (Bogenlänge) findet sich in den Oszillogrammen noch eine Anzahl von Kurzschlüssen (in den Tabellen 1 bis 3 mit aufgeführt), bei denen die Spannung auf einen Wert zwischen 0 und 10 V zusammenbricht, für die sich jedoch in den Zeitlupenfilmen keine Berührung des schmelzflüssigen Elektrodenwerkstoffes mit dem Werkstück finden läßt [32].

Die Ergebnisse der Filmauswertung sind in den Tabellen 1 bis 3 zusammengestellt. Es ist kein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Materialvolumen eines Tropfens und der entsprechenden Kurzschlußzeit zu erkennen. Ermittelt man rechnerisch unter Vernachlässigung des kubischen Ausdehnungskoeffizienten das gesamte Materialvolumen V'_M , das bei angegebener Elektrodenvorschubgeschwindigkeit und Abschmelzzeit abgeschmolzen wird, so erhält man, bezogen auf den Gesamtdurchmesser der Elektrode, Werte, die in allen Fällen kleiner sind als die experimentell ermittelten. Diese Differenzen können nicht auf eine Vernachlässigung des kubischen Ausdehnungskoeffizienten zurückgeführt werden. Es wird angenommen, daß das am Elektrodenende für den Werkstoffübergang zur Verfügung stehende Materialvolumen keinen vollen Querschnitt besitzt. Aufgefangene Elektrodentropfen bestätigen ebenso wie Untersuchungen von LAPIDUS [33] diese Vermutung. Das kinematographische Verfahren gestattet mit Hilfe der beschriebenen Filmauswertung keine quantitative Erfassung des Abschmelzcharakters und ermöglicht dadurch auch keine quantitative Auswertung von Schweißoszillogrammen hinsichtlich der Tropfengröße.

Definition der Bogenlänge für den Schweißlichtbogen mit abschmelzender Elektrode

Unter der Bogenlänge versteht man allgemein beim Kohlelichtbogen nach FINKELNBURG [34] den Abstand von der Spitze der negativen Elektrode bis zur Stirnfläche der positiven Elektrode, so wie sie in der Seitenprojektion erscheint. Befindet sich auf den Elektroden ein Krater, so ist diese Kratertiefe bei der Bestimmung der effektiven Bogenlänge zu berücksichtigen. Der so als Bogenlänge definierte Abstand ist auf den Schweißlichtbogen mit nichtabschmelzender Elektrode zu übertragen. Dieser wird bei kon-

stanter Bogenlänge durch die Spannungsverteilung zwischen den Elektroden und die Bogenbrennspannung charakterisiert.

Die Bestimmung der Bogenlänge bereitet bereits beim Kohlelichtbogen infolge der Bogenschwankungen Schwierigkeiten, die sich beim Schweißlichtbogen mit abschmelzender Elektrode erheblich steigern. Hier ändern die schmelzflüssigen Oberflächen, zwischen denen der Werkstoffübergang erfolgt, sehr schnell und regellos ihre Form, und es ist deshalb insbesondere beim Verschweißen von grobtropfigen Elektroden nicht möglich, den Abstand zu messen, der nach FINKELNBURG als Bogenlänge bezeichnet wird. Aus diesem Grunde stellt die Bestimmung der Bogenlänge in der Schweißtechnik für den Lichtbogen mit abschmelzender Elektrode ein bisher noch ungelöstes Problem dar. PFLUG und SEELIGER [9] haben deshalb für die Bogenlänge als äquivalente Vergleichsgröße die Schweißspannung eingeführt. Auch McMASTER, MARTIN und LEATHERMAN [12] sowie WYANT und Mitarbeiter [35] benutzten zur Charakterisierung des Schweißlichtbogens mit abschmelzender Elektrode die Schweißspannung anstatt die Bogenlänge. Dies ist jedoch nicht zulässig, wenn verschiedene Elektrodentypen auf Grund ihrer Schweißspannung hinsichtlich der Bogenlänge miteinander verglichen werden, da bei gleicher Schweißspannung nicht die gleiche Bogenlänge vorliegt. Die Schweißspannung ist nicht nur eine Funktion der Schweißstromstärke und der Bogenlänge, sondern auch eine Funktion der effektiven Ionisierungsspannung des Bogengasgemisches. Es ist deshalb unumgänglich, einen meßbaren Abstand zwischen Elektrode und Werkstück zu definieren, der bei konstanter Stromstärke zur Charakterisierung des Schweißlichtbogens mit abschmelzender Elektrode benutzt werden kann. Auf den Lichtbogen mit grobtropfig abschmelzender Elektrode ist jedoch der von FINKELNBURG für den Kohlelichtbogen als Bogenlänge festgelegte Abstand nicht zu übertragen, da er hier weder physikalisch sinnvoll noch meßtechnisch erfaßbar ist. Da der Schweißlichtbogen mit abschmelzender Elektrode nicht nur durch die Schweißspannung, sondern auch durch den Abschmelzverlauf der Elektrode charakterisiert wird, ist ein Abstand als Bogenlänge zu definieren, in dessen Abhängigkeit sich sowohl die Schweißspannung als auch der Abschmelzcharakter der Elektrode eindeutig ändern.

Wie die Beschreibung des Abschmelzcharakters für eine Elektrode vom Typ Ti VII m zeigte (s. S. 11 bis 17), wird die Werkstoffübertragung durch die Berührung des

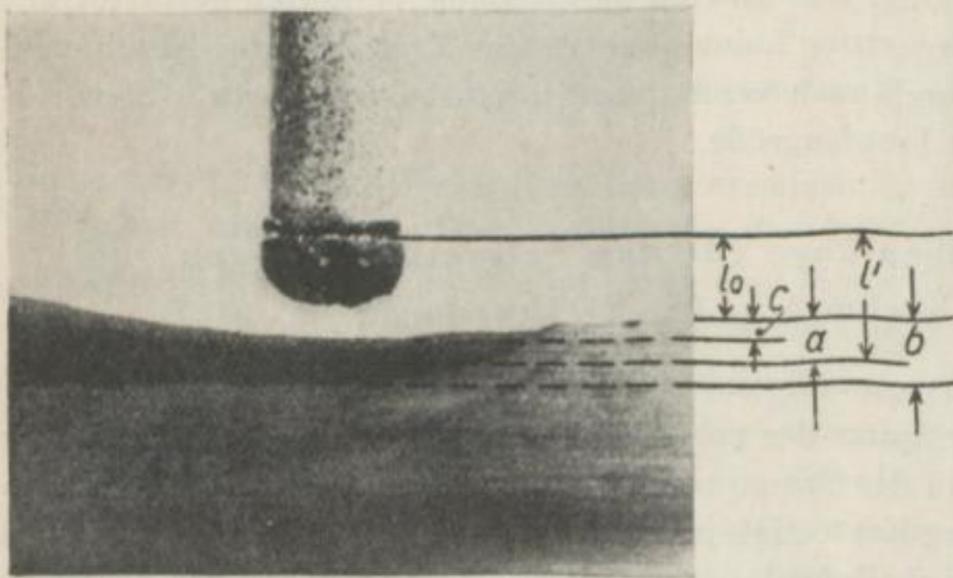


Bild 5. Zur Bestimmung der Bogenlänge

flüssigen Elektrodenwerkstoffes mit dem Schmelzbad auf dem Werkstück eingeleitet. Alle Zeitlupenaufnahmen zeigen, daß diese Berührung bei Elektroden, deren Werkstoffübergang unter Kurzschlußbildung erfolgt, durch den gut sichtbaren Abstand l_0 , begrenzt durch das noch nicht aufgeschmolzene Elektrodenende und die Werkstückoberfläche, bestimmt wird (Bild 5). Dieser Abstand zwischen

Elektrode und Werkstück darf sich bei richtiger Einstellung der Elektrodenvorschubgeschwindigkeit nicht ändern, wenn ein kontinuierlicher Abschmelzverlauf und ein stabil brennender Schweißlichtbogen gewährleistet sein sollen. Die konstante Länge des Abstandes während des Abschmelzverlaufes, die durch ihn festgelegte Schweißspannung sowie sein entscheidender Einfluß auf die Tropfenausbildung und Einleitung der Werkstoffübertragung kennzeichnen ihn sinnvoll als Bogenlänge l_0 (scheinbare Bogenlänge). Die effektive Bogenlänge l' ergibt sich, wie Bild 5 zeigt, unter Berücksichtigung der Eindringtiefe des Bogens a in das Werkstück:

$$l' = l_0 + a, \quad \text{wobei} \quad a \approx c + \frac{b-c}{2}.$$

Die Begrenzung der effektiven Bogenlänge auf der Werkstückseite erfolgt auf Grund der Auswertung von Zeitlupenfilmen. Hier zeigt sich, daß zwischen der Einbrandtiefe und der Eindringtiefe des Lichtbogens in das Werkstück ein Schmelzbad vorhanden ist. Die Einbrandtiefe ergibt also einen zu großen Wert für die effektive Bogenlänge, die Tiefe des Endkraters einen zu kleinen Wert, da sich der Endkrater nach Beendigung der Schweißung durch eine teilweise Auffüllung des durch die Eindringtiefe geschaffenen Kraters mit Schweißgut ergibt. Da sich mit steigender Schweißgeschwindigkeit sowohl die Einbrandtiefe als auch die Tiefe des Endkraters verringern, ergibt die beschriebene Bestimmung der Eindringtiefe näherungsweise einen brauchbaren Wert.

Ist die Eindringtiefe des Bogens in das Werkstück so gering, daß die Berührung des flüssigen Elektrodenwerkstoffes mit dem Schmelzbad infolge turbulenter Wallungen in der Ebene der Werkstückoberfläche erfolgt, so ist zur Charakterisierung des Schweißlichtbogens die Bogenlänge l_0 zu benutzen. Für den untersuchten Elektrodentyp ist die Eindringtiefe a bei verschiedenen Schweißstromstärken in Abhängigkeit von der Bogenlänge l_0 in Tabelle 4 zusammengestellt und in Bild 6 aufgetragen. Die maximale Eindringtiefe $\leq 1,5$ mm und die Auswertung der Zeitlupenfilme zeigen, daß die Berührung des Elektrodenwerkstoffes mit dem Schmelzbad ausschließlich in der Ebene der Werkstückoberfläche erfolgt.

Bei großtropfigen Elektroden ist im allgemeinen die Eindringtiefe des Bogens in das Werkstück im Vergleich zu feintropfigen Elektroden gering. Der Fehler, der durch die Zuordnung der scheinbaren Bogenlänge l_0 anstatt der effektiven Bogenlänge l' zur Schweißspannung entsteht, ist von untergeordneter Bedeutung, wenn der Schweißlichtbogen durch den Abschmelzverlauf oder dieser selbst charakterisiert werden soll.

Tabelle 4. Eindringtiefe a des Lichtbogens in das Werkstück
in Abhängigkeit von der Bogenlänge l_0

Elektrode Ti VII m; 4 mm \varnothing ; Schweißgeschwindigkeit $v = 20$ cm/min (hierzu Bild 6)

$J_s = 140$ A			$J_s = 160$ A			$J_s = 190$ A		
U_S [V]	l_0 [mm]	a [mm]	U_S [V]	l_0 [mm]	a [mm]	U_S [V]	l_0 [mm]	a [mm]
19,25	1,75	0,25	19,95	3,00	0,62	20,30	2,50	0,64
20,00	3,50	0,59	20,92	3,95	0,83	22,70	3,80	1,05
20,50	4,20	0,75	21,45	4,40	0,95	23,75	4,30	1,30
21,20	5,30	0,90	22,75	5,40	1,05	27,70	5,50	1,50
21,80	6,10	0,85	25,45	6,80	0,75	30,50	6,40	1,10
22,90	7,30	0,45	—	—	—	—	—	—

Entsteht beim Verschweißen von fein- und mitteltropfigen Elektroden ein Elektrodenkrater mit der Tiefe d , so ist zur Bestimmung der scheinbaren Bogenlänge l_0 der Abstand zwischen dem Ende der Elektrodenumhüllung und dem Werkstück zu messen, so wie er in der Seitenprojektion erscheint. Zur Ermittlung der Bogenlänge l' sind die Tiefe des Endkraters am Elektrodenende d sowie die Eindringtiefe des Lichtbogens a in das Werkstück zu berücksichtigen:

$$l' = l_0 + a + d.$$

Insbesondere bei Elektroden, die einen tiefen Einbrand liefern, ist unbedingt die effektive Bogenlänge zur Charakterisierung des Schweißlichtbogens zu benutzen, da

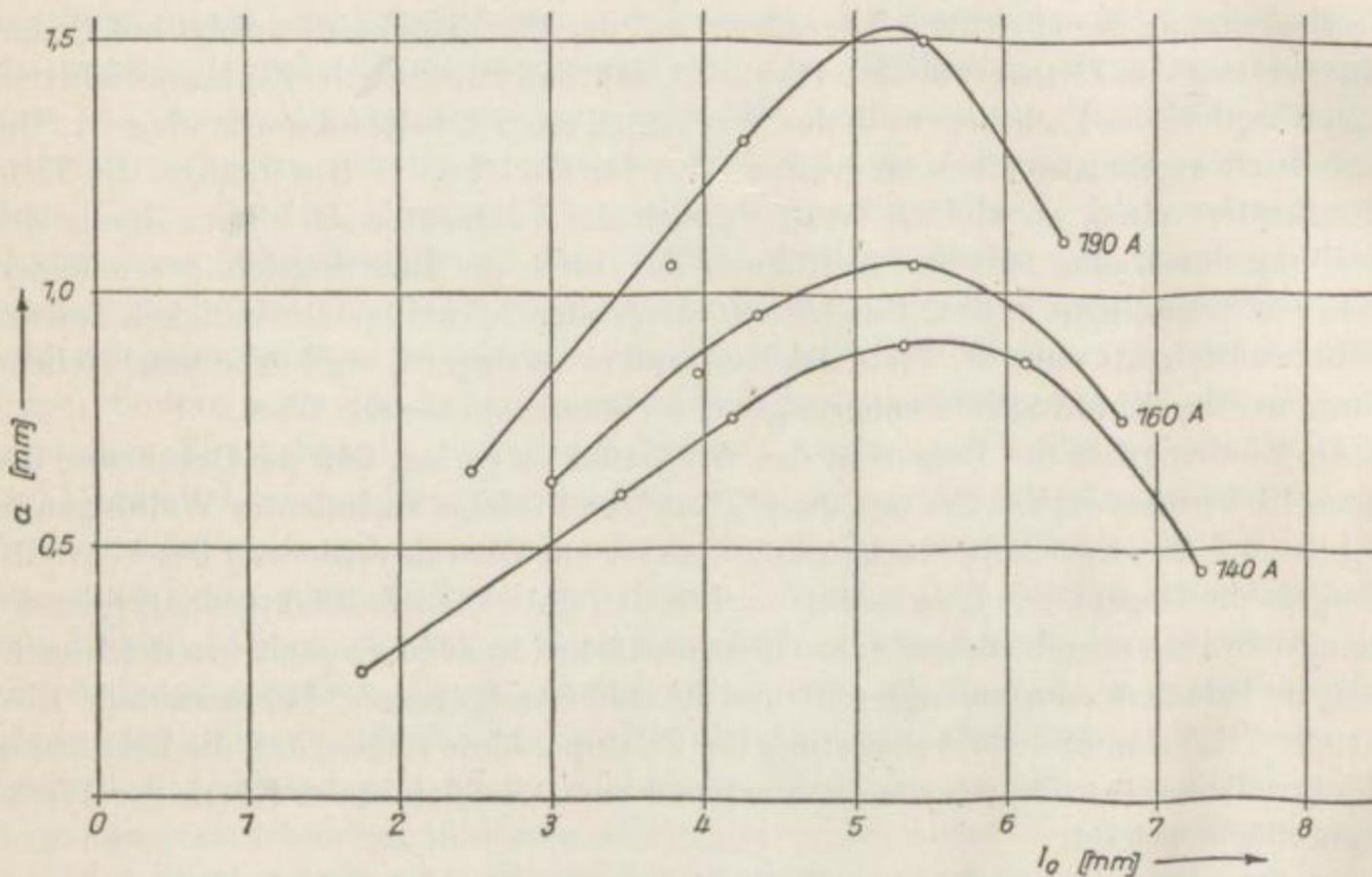


Bild 6. Eindringtiefe a des Lichtbogens in Abhängigkeit von der Bogenlänge l_0 ;
Elektrode Ti VII m; 4 mm \varnothing

hier der Spannungsgradient der Säulenspannung erheblich größer sein kann als bei Elektroden mit einem geringen Einbrand und die Zuordnung der scheinbaren Bogenlänge l_0 zur Schweißspannung einen merklichen Fehler ergibt. Außerdem vollzieht sich die Metallübertragung vorwiegend in dem Abstand, der als effektive Bogenlänge bezeichnet ist.

Damit ist im Rahmen der vorliegenden Aufgabenstellung das Problem der Bogenlängenbestimmung unter Berücksichtigung des Abschmelzverlaufes der Elektrode und der effektiven Ionisierungsspannung des Bogengasgemisches als gelöst zu betrachten.

Lösungswege

Ein Verfahren zur Veränderung des Abschmelzcharakters, wie er sich auf Grund der chemisch-physikalischen Beschaffenheit der Elektrode und durch die richtige Wahl der auf S. 11 erwähnten Schweißparameter ergibt, erscheint nur dann sinnvoll,

wenn hiermit keine nennenswerte Verminderung der Abschmelzleistung verknüpft ist. Da die maximale Abschmelzleistung durch die zulässige Grenzerwärmung des Elektrodeneinspannendes bestimmt wird, ist jedem Elektrodentyp in Abhängigkeit des Kerndrahtdurchmessers eine maximale Schweißstromstärke zugeordnet. Die einzuschlagenden Lösungswege müssen also Verfahren beinhalten, die unabhängig vom Effektivwert des Schweißstromes zu einer Veränderung des Abschmelzcharakters durch den elektrischen Anschlußkreis führen. Dies fordert nicht nur die Wirtschaftlichkeit einer geeigneten Verfahrenstechnik, sondern auch der Nachweis, daß eine Veränderung des Abschmelzcharakters nur durch den elektrischen Anschlußkreis und nicht gleichzeitig durch die Schweißstromstärke erfolgt.

Die Vorversuche ergaben (s. S. 11 bis 17), daß der Pinch-Effekt und die Stromwärme in der Kurzschlußbrücke einen wesentlichen, der Größenordnung nach noch unbekanntem Einfluß auf die Materialübertragung unter Kurzschlußbildung gewinnen. Hierbei zeigte die oszillographische Registrierung des Schweißstromes besonders eindrucksvoll, daß jeder Schweißvorgang einen Ausgleichsvorgang liefert, dessen Verlauf vom Aufbau der Umformtype, von der Induktivität und dem Ohmschen Widerstand des Schweißkreises abhängt [36]. Einen Oszillogrammausschnitt beim Verschweißen der ausgewählten Elektrodentypen mit dem angegebenen Schweißumformer zeigt Bild 7. Durch Regelung des zeitlichen Verlaufes sowie des Maximalwertes der Kurzschlußstromstärke während des Tropfenkurzschlusses können die einschnürende Wirkung des Pinch-Effektes, die Widerstandserwärmung in der Kurzschlußbrücke und damit der Abschmelzcharakter verändert werden. Gegenüber der Normalschweißung, wie sie durch den verwendeten Umformertyp vorliegt, wird diese Veränderung dadurch erreicht, daß zusätzlich eine Induktivität in Reihe oder eine Kapazität parallel zur Bogenstrecke geschaltet wird. Die Bilder 7 bis 9 zeigen den Einfluß einer zusätzlich in den Schweißkreis eingefügten Induktivität und einer Kapazität auf den Verlauf der Stromkurve im Vergleich zum Stromverlauf, wie er durch den verwendeten Umformertyp bestimmt wird. Die unterschiedliche Kurzschlußanzahl und -dauer kennzeichnen bei gleicher Abschmelzzeit die Veränderung des Abschmelzcharakters durch den elektrischen Anschlußkreis.

Eine andere Möglichkeit, den Abschmelzcharakter einer Elektrode durch den elektrischen Anschlußkreis zu verändern, bietet das Schweißen mit Stromimpulsen. Dieser Lösungsweg sei bereits an dieser Stelle ausführlicher beschrieben, da das Verfahren späterhin wieder aus dem Rahmen der Arbeit herausfällt und mit Rücksicht auf die quantitative Erfassung des Abschmelzcharakters nur der erstbeschriebene Lösungsweg weiter verfolgt wird.

Das Schweißen mit Stromimpulsen läßt sich auf Elektroden, deren Werkstoffübergang mit und ohne Kurzschlußbildung erfolgt, anwenden. Ausgangspunkt für die Entwicklung einer Anordnung zum Schweißen mit Stromimpulsen war der Gedanke, durch eine pulsierende Wechselstromleistung, die in ihrer Frequenz der Tropfenfrequenz angepaßt werden kann, das schmelzflüssige Elektrodenmaterial zum Verlassen der Elektrode zu zwingen. Der ausgewählte Elektrodentyp liefert bei einer Schweißstromstärke von 160 A und einer Schweißspannung von 20 V ca. 30 Kurzschlüsse pro Sekunde (s. Tabelle 1). Für eine Anpassung der pulsierenden Wechselstromleistung an die Tropfenfrequenz ist deshalb ein Schweißstrom von etwa 15 Hz erforderlich. Ein solcher

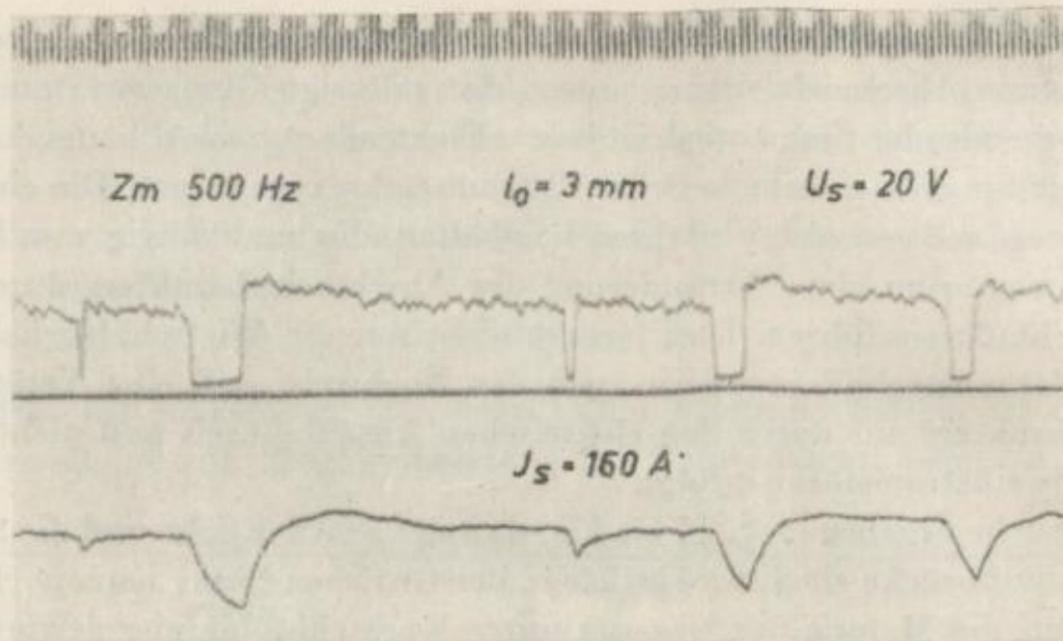


Bild 7. Strom-Spannungsverlauf beim Werkstoffübergang (Normalschweißung)

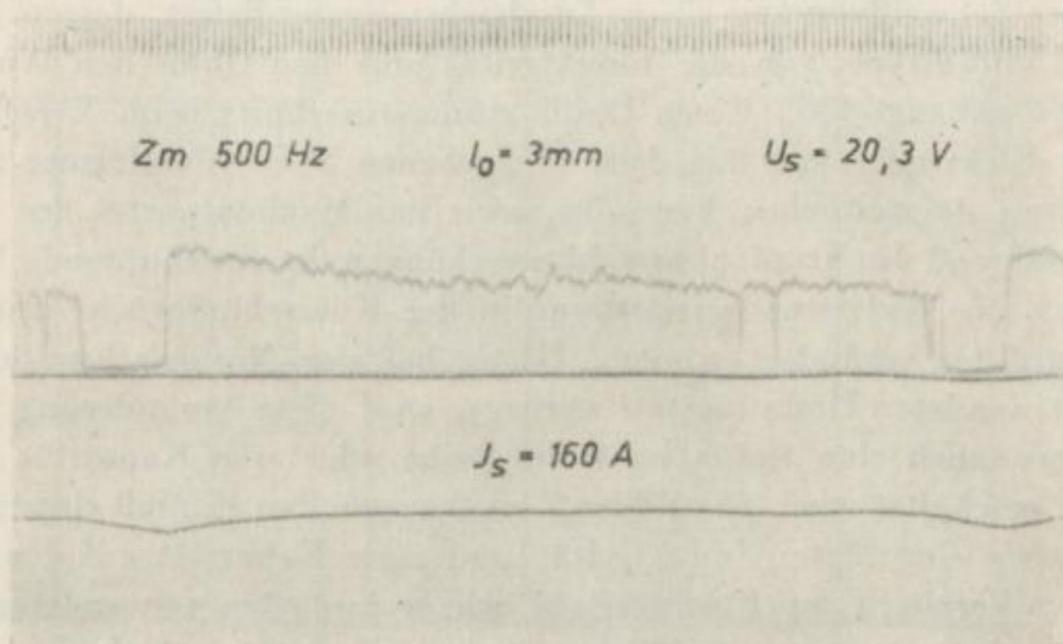


Bild 8. Einfluß einer zusätzlich in den Schweißkreis eingefügten Induktivität auf den Strom-Spannungsverlauf beim Werkstoffübergang

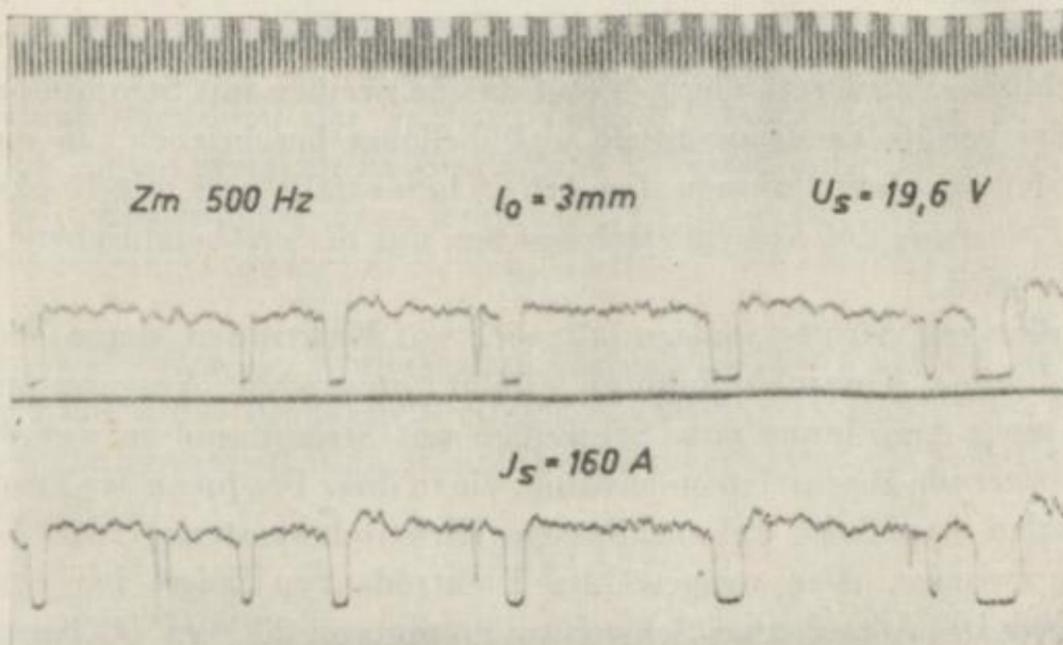


Bild 9. Einfluß einer parallel zur Bogenstrecke geschalteten Kapazität auf den Strom-Spannungsverlauf beim Werkstoffübergang

Schweißstrom liefert jedoch zwischen Metallelektroden keinen stabilen Lichtbogen. Infolge der zu großen elektrischen Zeitkonstanten kann die Stabilisierung des Lichtbogens nicht mit Hilfe eines hochfrequenten Hilfsstromes erreicht werden [37]. Für die Aufrechterhaltung des Lichtbogens wurde deshalb ein Gleichstrom gewählt und dessen Größe so eingestellt, daß lediglich ein Aufschmelzen des Elektrodenwerkstoffes stattfindet, ohne daß ein wesentlicher Anteil des aufgeschmolzenen Materials in das Schmelzbad übergeht. Dieser Gleichstromkomponente wurde ein Wechselstrom, dessen Frequenz zwischen 15 und 25 Hz regelbar war, überlagert. Erst diese überlagerte Stromkomponente führte zur Abtrennung des am Elektrodenende vorhandenen schmelzflüssigen

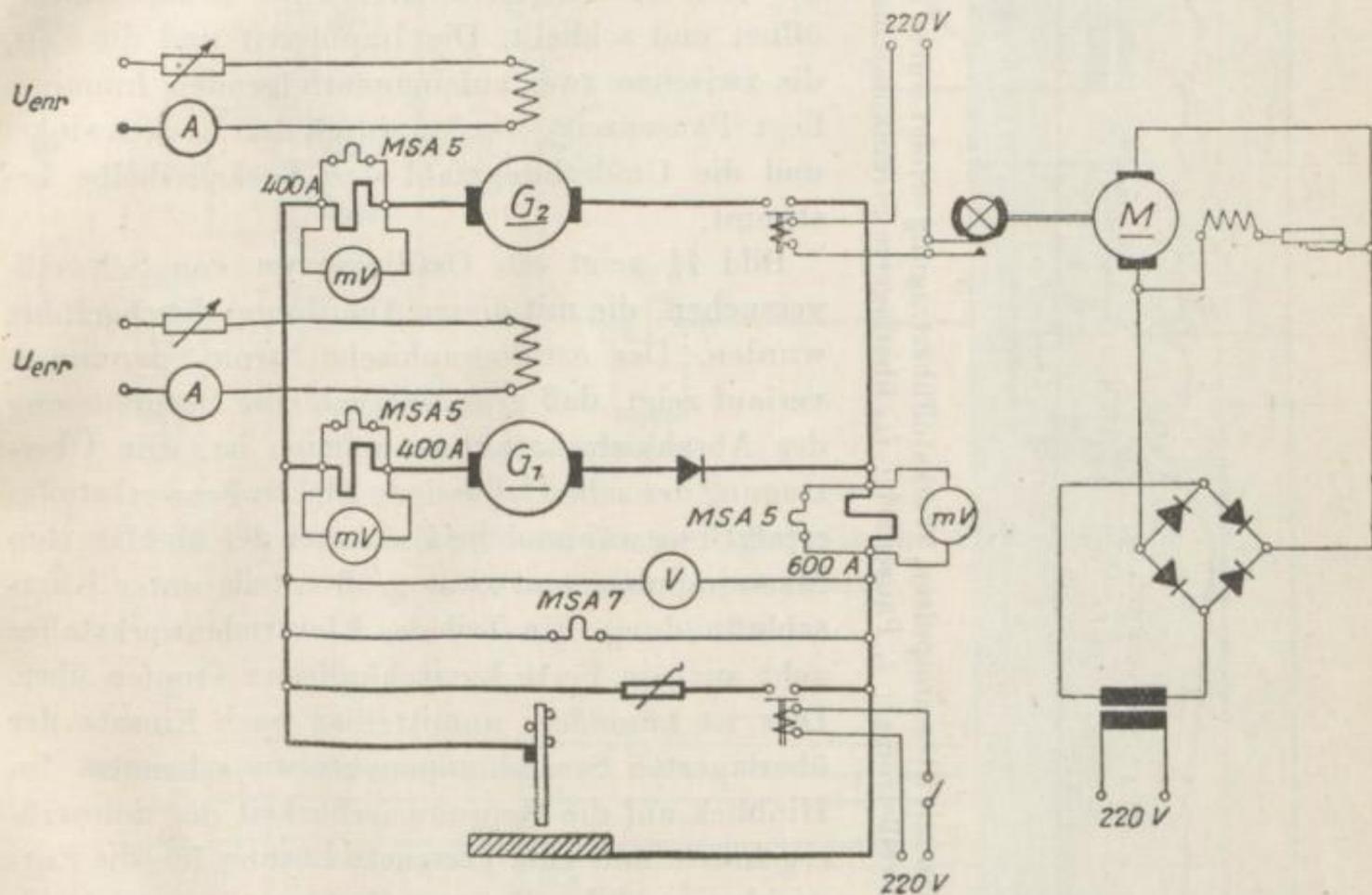


Bild 10. Versuchsanordnung für das Schweißen mit Stromimpulsen (mechanischer Impulsgeber)

Materials. Der Effektivwert des gesamten Schweißstromes kann dem jeweiligen Elektrodentyp und -durchmesser angepaßt werden. Da die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Leistungsimpulsen nicht unabhängig von der Dauer eines Leistungsimpulses geregelt werden kann, war keine nennenswerte Beeinflussung des Abschmelzcharakters festzustellen.

Um einen Einfluß auf die Heizzeiten der Elektrode zu erzielen, wurde der Grundkomponente des Schweißstromes eine Stromkomponente in Form einzelner Impulse überlagert, die nach Größe und Zeitdauer gesteuert werden konnten. Die Steuerung dieser Stromimpulse erfolgte zunächst mit Hilfe eines Nockenschalters. Die Versuchsanordnung hierfür zeigt Bild 10. Der Generator G 1 liefert die Grundkomponente, die für die Aufrechterhaltung des Lichtbogens und je nach Einstellung der Schweißstromstärke für das mehr oder weniger starke Aufschmelzen der Elektrode verantwortlich ist. Der Generator G 2 wird periodisch über einen Nockenschalter, der ein Schaltschütz

Freiberg i. Sa.
- Institut für
Schweißtechnik

betätigt, in den Schweißkreis geschaltet. Dadurch wird die vom Generator G 2 gelieferte Stromkomponente der ersten in Form einzelner Impulse überlagert und dient zur Ablösung des schmelzflüssigen Elektrodenmaterials. Die Regelung der Schweiß-

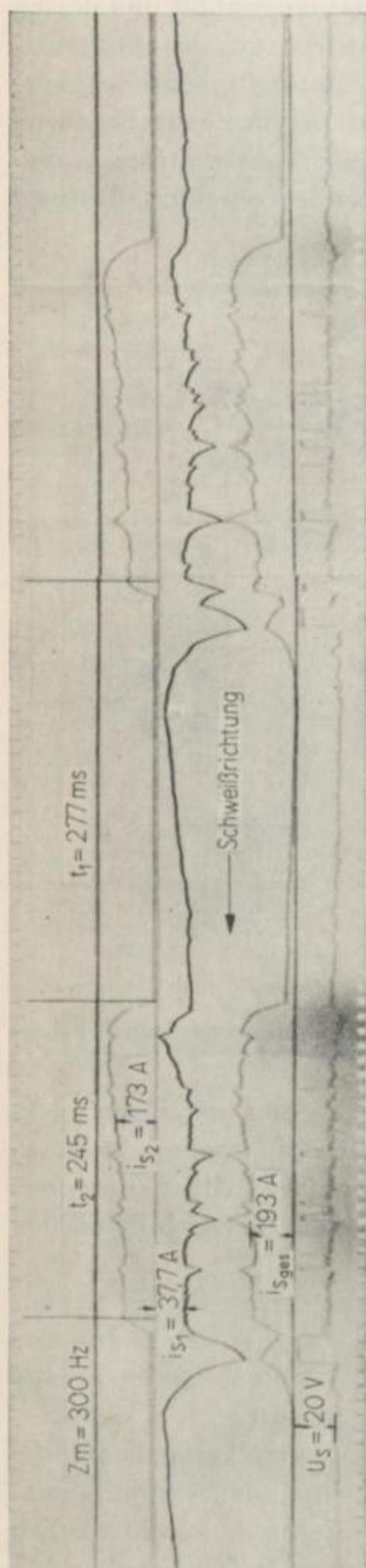


Bild 11. Strom-Spannungsverlauf beim Schweißen mit Stromimpulsen. Werkstoffübertragung erfolgt unter Kurzschlußbildung (hierzu Bild 10). i_{s1} Grundkomponente des Schweißstromes; t_1 Pausenzeit; i_{s2} überlagerte Stromkomponente; t_2 Impulszeit

stromstärke erfolgt für die einzelnen Stromkomponenten getrennt durch Regelung des Erregerstromes der beiden Generatoren (Umformertyp: $2 \times \text{KW } 360$, Schaltplan wie KW 500, s. Bild 2). Der Impulsgeber besteht aus einem regelbaren Nebenschlußmotor, der über ein Getriebe einen Nockenschalter betätigt, der den Wicklungsstromkreis eines Schaltschützes öffnet und schließt. Die Impulszeit und die Zeit, die zwischen zwei aufeinanderfolgenden Impulsen liegt (Pausenzeit), werden durch den Nockenwinkel und die Umdrehungszahl der Nockenscheibe bestimmt.

Bild 11 zeigt ein Oszillogramm von Schweißversuchen, die mit dieser Anordnung durchgeführt wurden. Der oszillographische Strom-Spannungsverlauf zeigt, daß grundsätzlich eine Beeinflussung des Abschmelzcharakters möglich ist. Die Übertragung des schmelzflüssigen Elektrodenwerkstoffes erfolgt nur während der Zeitdauer der überlagerten Stromimpulse, und zwar größtenteils unter Kurzschlußbildung. Ein Teil des Elektrodenwerkstoffes geht auch in Form kurzschlußfreier Tropfen über. Dies ist besonders unmittelbar nach Einsatz der überlagerten Stromkomponente zu erkennen. Im Hinblick auf die Reproduzierbarkeit der Schweißergebnisse und eine geeignete Lösung für die Entwicklung und den Bau von Geräten, die das Schweißen mit Stromimpulsen nach der beschriebenen Methode gestatten, wurde die Versuchsanordnung verbessert. Den Schaltplan dieser verbesserten Versuchsanordnung zeigt Bild 12. Die Grundkomponente des Schweißstromes wird weiterhin von einem Gleichstromschweißumformer vom Typ KW 360 geliefert, die überlagerte Stromkomponente dagegen von einem KJELLBERG-Schweißtransformator vom Typ KTD 1000 (Schaltplan und statische Kennlinien des Schweißtransformators s. Bild 13 und Bild 14). Der dem Transformator entnommene Strom wird, um den Einfluß eines Schweißstromes von 50 Hz auf den Werkstoffübergang auszuschalten und die Bogenstabilität zu erhöhen [38], über einen Gleichrichter in Graetzschaltung der Bogenstrecke

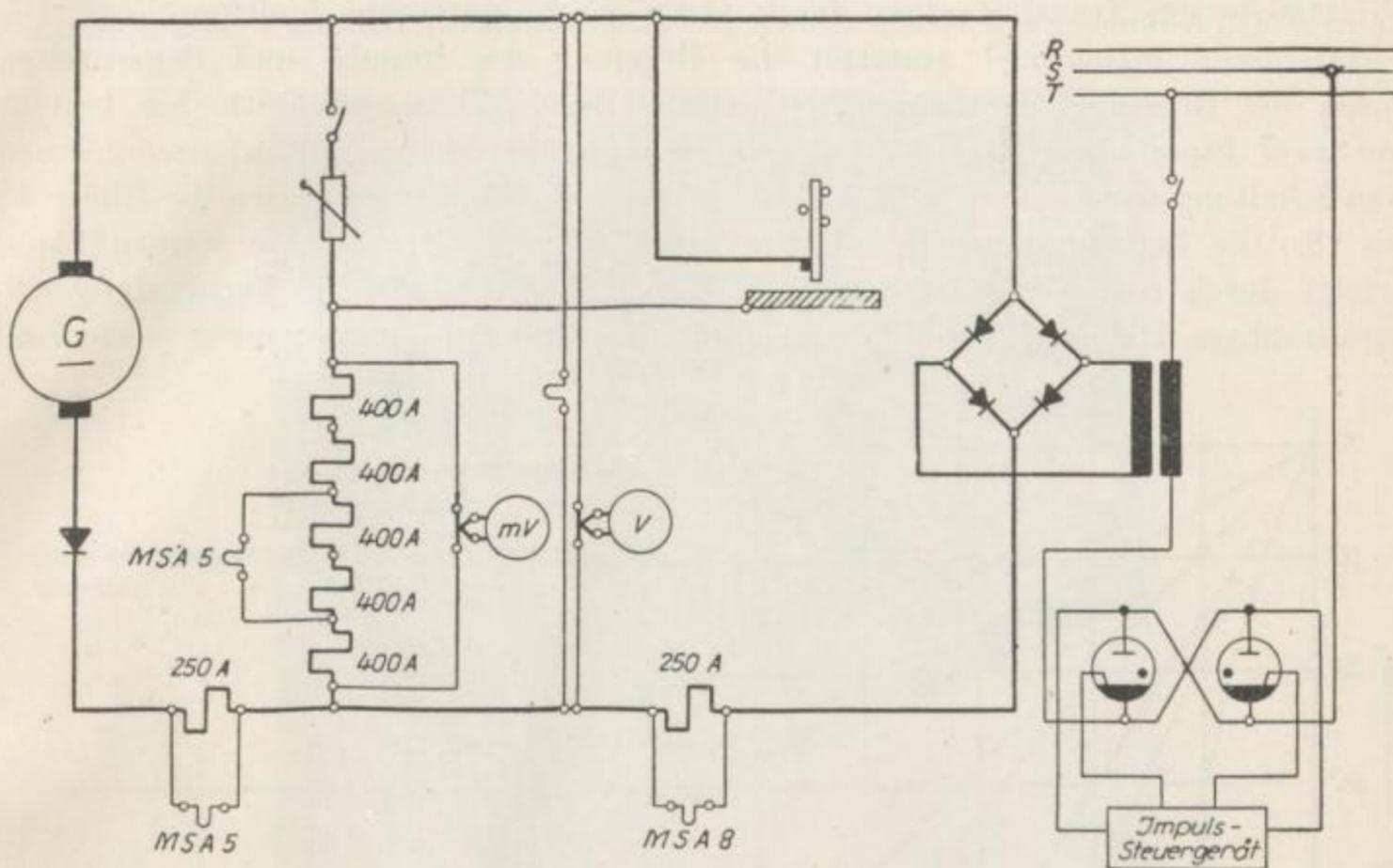


Bild 12. Versuchsanordnung für das Schweißen mit Stromimpulsen (elektronischer Impulsgeber)

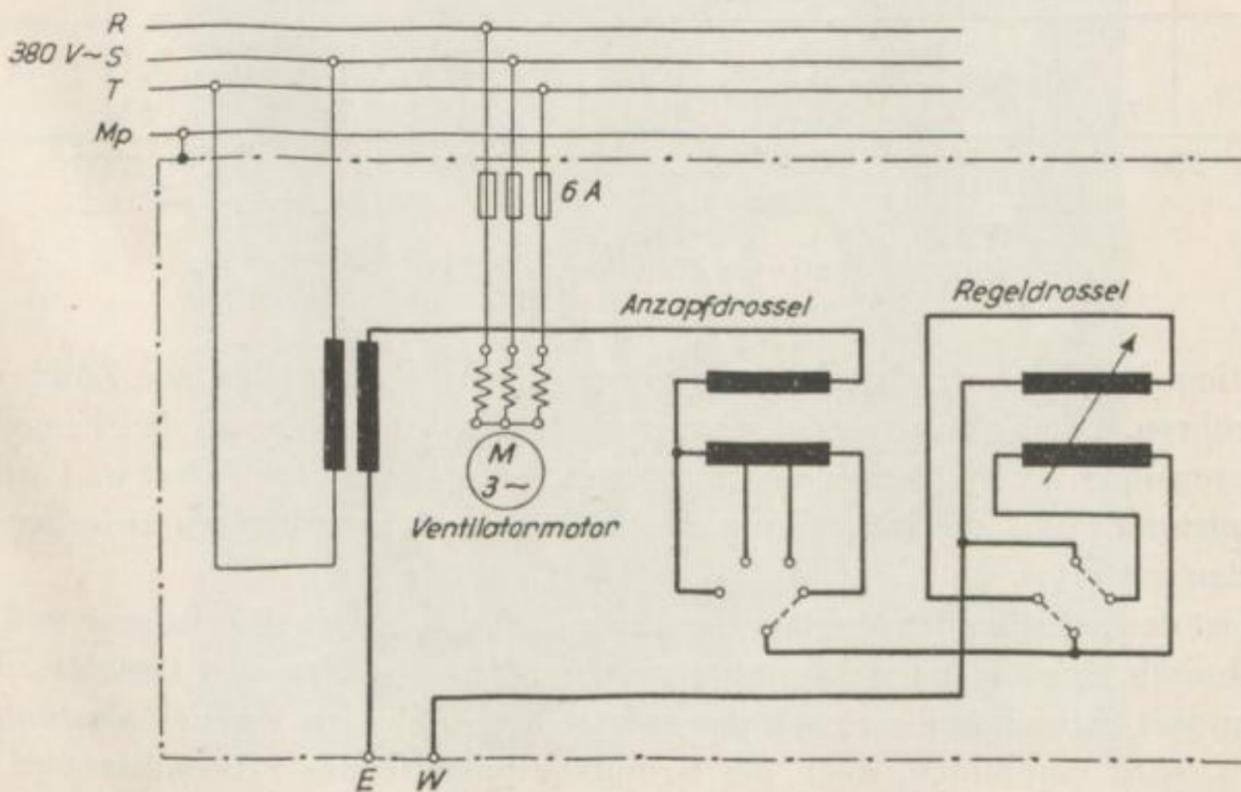


Bild 13. Schaltplan des KJELLBERG-Schweißtransformators vom Typ KTD 1000 DB; Nr.147 287; 380 V 50 Hz; $\cos \varphi$ 0,7; J 190 A; J_K 390 A; 72/149 kVA; DB 40 V 1000 AV_{leer} 70 V; Regelb. 30 V—40 V; 250 A—1000 A

zugeführt. Das Zu- und Abschalten der überlagerten Stromkomponente erfolgt auf der Primärseite des Transformators durch elektronisch gesteuerte Ignitronröhren. Die elektronische Steuerung¹ gestattet die Regelung der Impuls- und Pausenzeiten sowie die Regelung der Schweißstromstärke durch Phasenanschnitt. Sie besteht aus zwei Einschüben, dem Takter und der Leistungsregelung. Den mechanischen und schaltungstechnischen Aufbau der elektronischen Steuerung zeigen die Bilder 15 bis 18. Die Leistungsregelung, die im Verhältnis 1:3 vorgenommen werden kann, erfolgt durch eine Vertikalsteuerung und enthält zusätzlich eine Verriegelung ungeradzahlgiger Halbwellen zur Vermeidung der Transformatorremanenz sowie eine

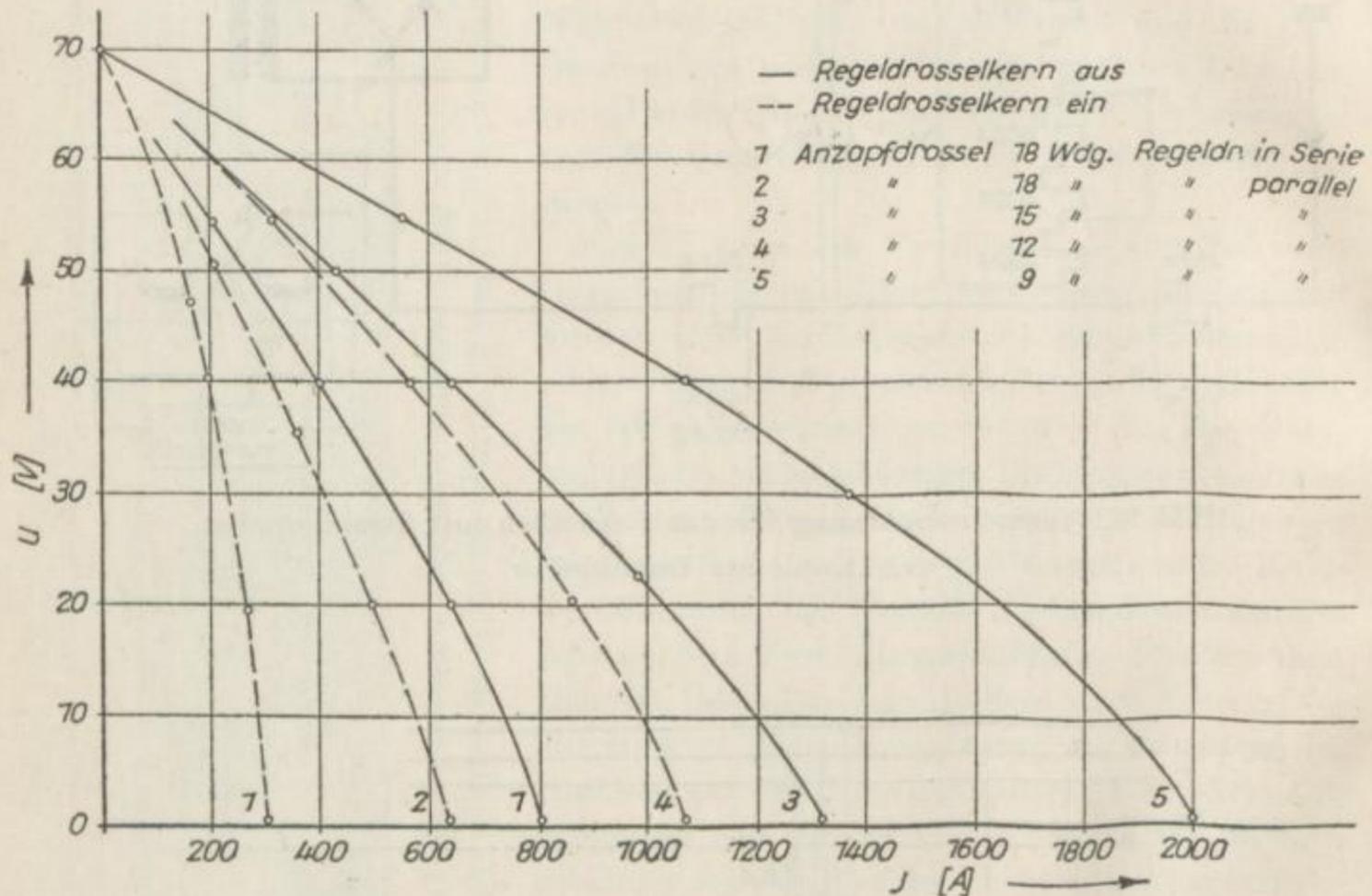


Bild 14. Statische Kennlinien KTD 1000 DB

Stabilisation für die Aufrechterhaltung symmetrischer Halbwellen zur Zündung der Ignitronröhren. Der Takter besteht aus einem Multivibrator, der an den Eingang der Leistungsregelung für die Dauer der Impulszeit Rechteckimpulse liefert und über die Potentiometer 1 und 2 die Einstellung der Pausen- und Impulszeiten zwischen 1 und 30 Perioden gestattet.

Damit ist das Schalten der überlagerten Stromkomponente nach Zeitdauer und Größe einer technisch einwandfreien Lösung zugeführt. Für den Bau von Geräten, die das Schweißen mit Stromimpulsen nach der zuletzt beschriebenen Versuchsanordnung ermöglichen, wird empfohlen, auch die Grundkomponente des Schweißstromes einem Schweißgleichrichter zu entnehmen.

¹ Die Steuerung wurde nach Angaben des Verfassers von der Versuchswerkstatt für Schweißmaschinen des VEB LEW Hans Beimler, Hennigsdorf, entwickelt und gebaut.

Die Bilder 19 bis 21 zeigen für eine Schweißstromstärke von 160 A bei einer Bogenlänge von etwa 4 mm die Veränderung des Abschmelzcharakters gegenüber der Normal-

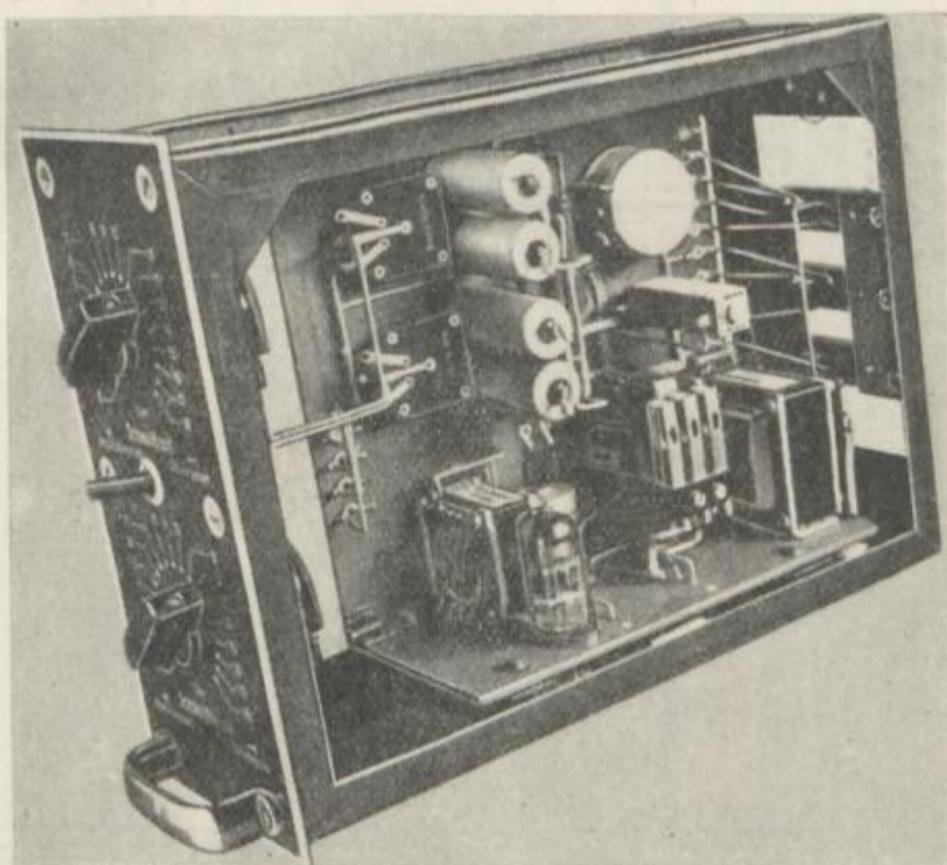


Bild 15. Ansicht des Takters

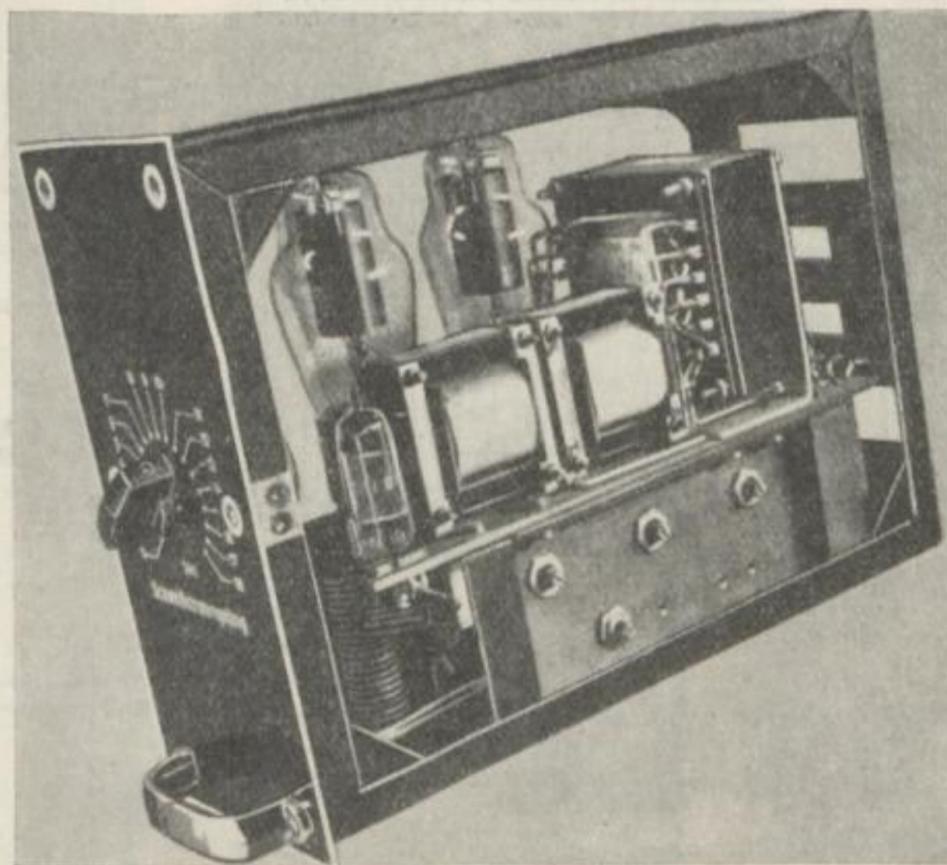


Bild 16. Ansicht der Leistungsregelung

schweißung (s. Bild 7). Durch die angewandte Verfahrenstechnik ist es möglich, den Abschmelzcharakter der untersuchten Elektrode so zu verändern, daß der Werkstoffübergang unter Kurzschlußbildung und/oder kurzschlußfrei erfolgt. Die Auswertung von

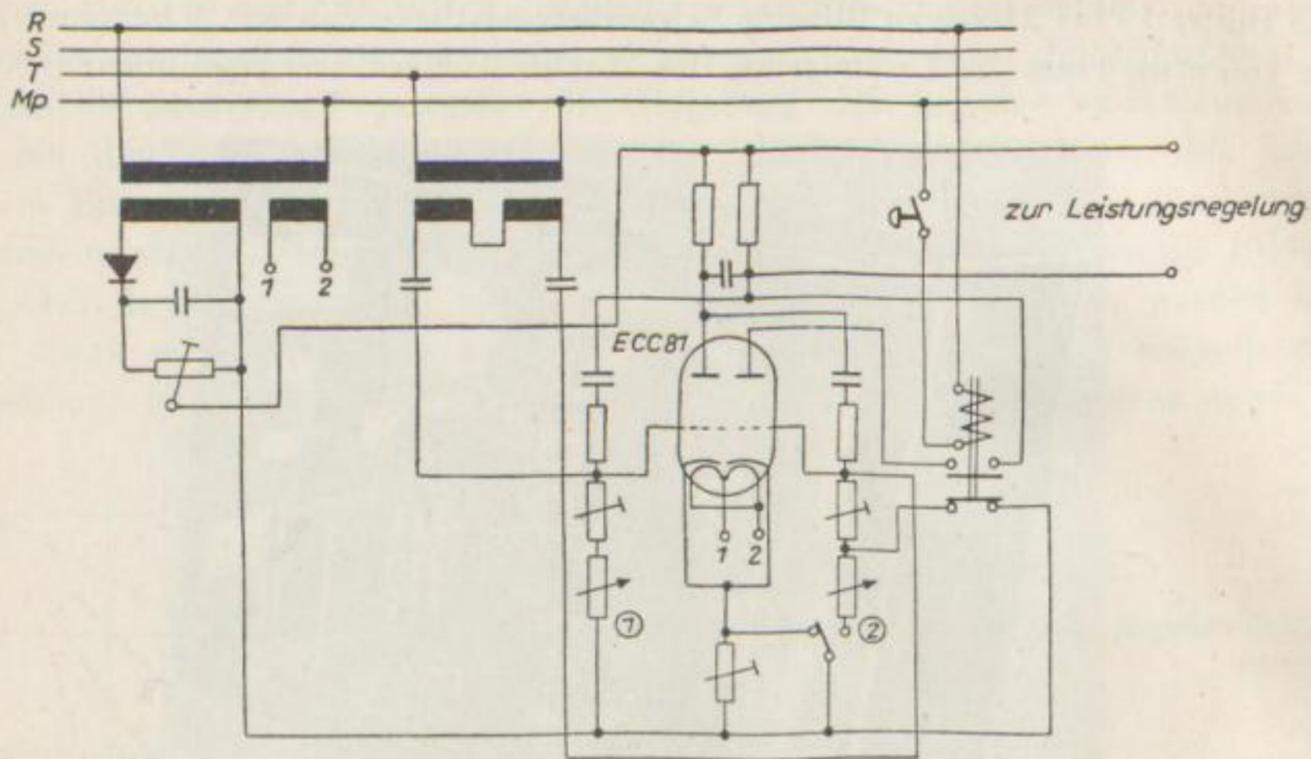


Bild 17. Schaltplan des Takters

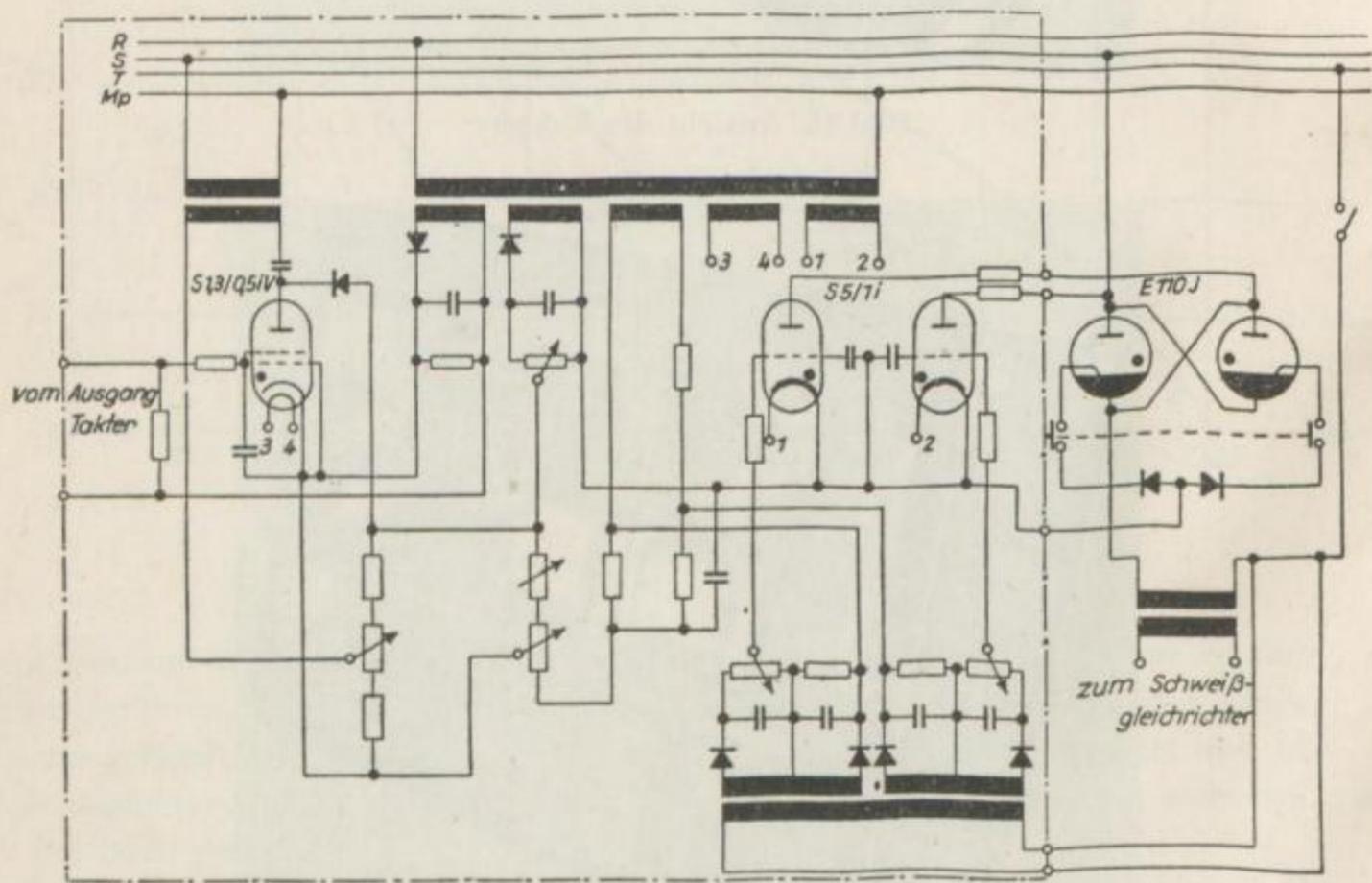


Bild 18. Schaltplan der Leistungsregelung

Bild 19 (auf Seite 29). Strom-Spannungsverlauf beim Schweißen mit Stromimpulsen. Werkstoffübertragung erfolgt unter Kurzschlußbildung (hierzu Versuchsanordnung Bild 12)

J_1 Grundkomponente des Schweißstromes	t_1 Pausenzeit
J_2 überlagerte Stromkomponente	t_2 Impulszeit

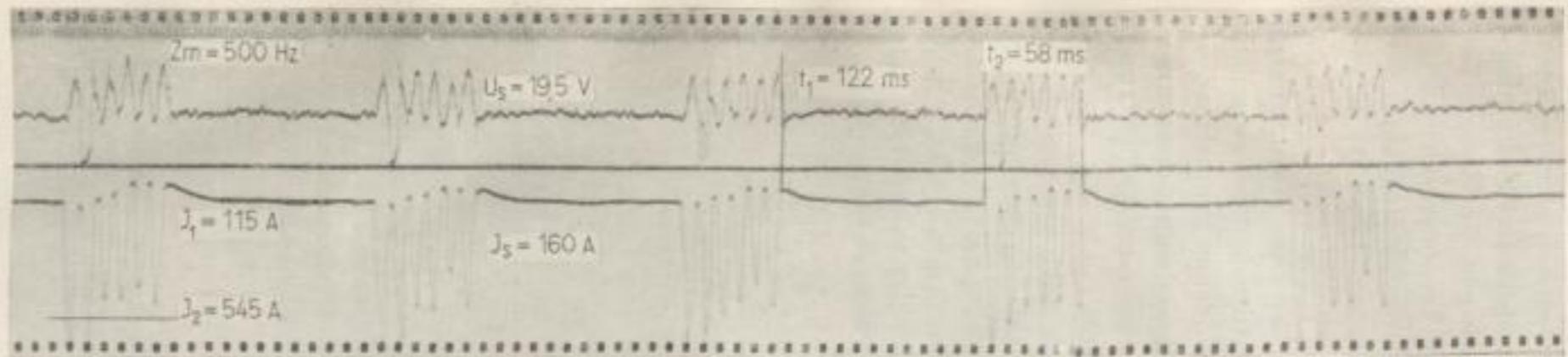


Bild 19

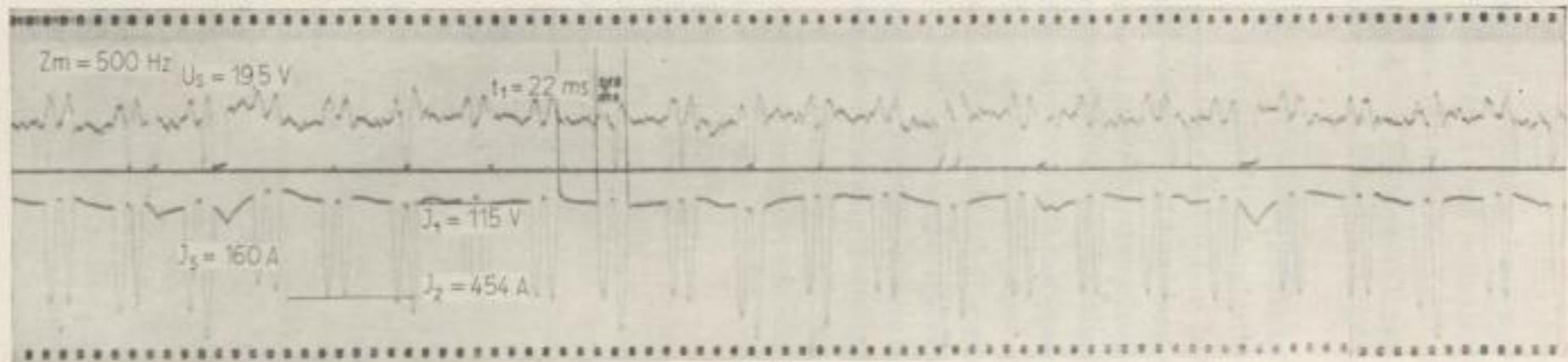


Bild 20

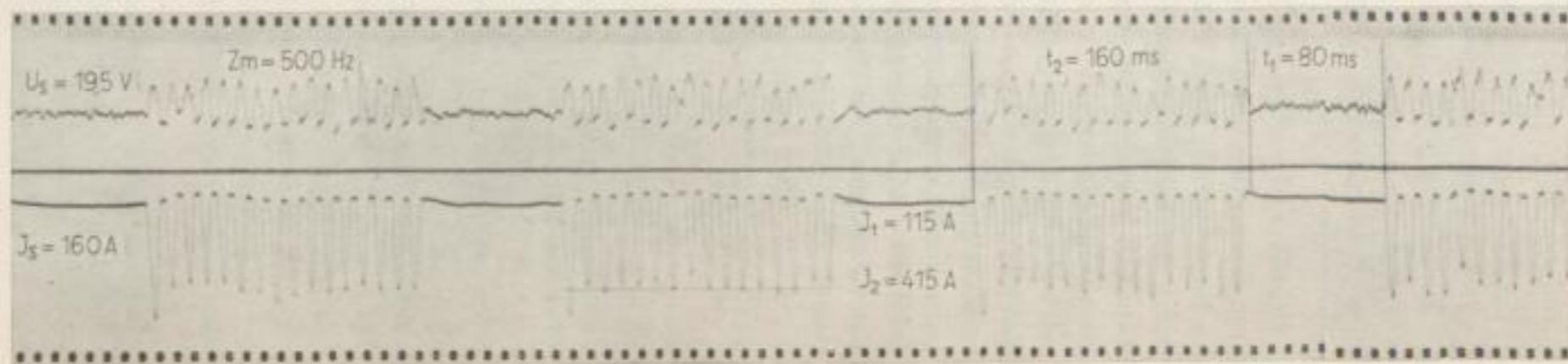


Bild 21

Bild 20. Strom-Spannungsverlauf beim Schweißen mit Stromimpulsen. Werkstoffübertragung erfolgt unter Kurzschlussbildung (hierzu Versuchsanordnung Bild 12)

Bild 21. Strom-Spannungsverlauf beim Schweißen mit Stromimpulsen. Werkstoffübertragung erfolgt ohne Kurzschlussbildung (hierzu Versuchsanordnung Bild 12)

Zeitlupenfilmen, die beim Schweißen mit Stromimpulsen aufgenommen wurden, führt zu der Annahme, daß die während der Impulsdauer entsprechend der Größe der überlagerten Stromkomponente auftretenden Druckkräfte im Lichtbogen die Ursache für die Veränderung des Abschmelzcharakters sind. Die entstehende Tropfenverkleinerung wird dadurch begünstigt, daß die Temperatur der Bogensäule durch Erhöhung der Schweißstromstärke von 100 auf 500 A während der Impulsdauer um etwa 1000° K ansteigt [39].

Beim Verschweißen von Tiefbrandelektroden (Ti/Tf VIII s, 4 mm Dmr.) verursachen die während der Impulsdauer auftretenden Druckkräfte ein Fortdrücken des zwischen der Eindringtiefe des Lichtbogens und der Einbrandtiefe vorhandenen Schmelzbades, so daß der Lichtbogen auf dem noch nicht aufgeschmolzenen Grundmaterial ansetzen kann. Das Verschweißen von hüllenlegierten Elektroden ergab neben einer Veränderung des Abschmelzcharakters eine Änderung des Auflegierungseffektes.

Sowohl die erzielte Veränderung des Abschmelzcharakters als auch die gerätetechnische Lösung lassen das beschriebene Verfahren im Hinblick auf eine Anwendung in der Praxis erfolgversprechend erscheinen. Da jedoch in Ermangelung einer geeigneten Meßmethode keine quantitative Erfassung des Abschmelzcharakters möglich ist, sobald die Werkstoffübertragung ohne Kurzschlußbildung erfolgt, wurde der zuletzt beschriebene Lösungsweg bei der Fortführung der Arbeit nicht mehr berücksichtigt.

Hauptversuche

Meßmethode

Der Abschmelzcharakter einer Elektrode ist durch ihr Tropfengewicht bestimmt. DOAN [10] und PATON [11] bestimmten das Tropfengewicht, indem sie die Schweißelektrode mit hoher Geschwindigkeit über das Werkstück führten, das mit Rücksicht auf das Verschweißen des Elektrodenmaterials mit dem Grundmaterial aus Kupfer bestand. Das abgeschmolzene Elektrodenmaterial ging dabei in Form kleiner Tropfen auf das verhältnismäßig kalte Werkstück über und ließ sich von diesem leicht entfernen und auswiegen. Diese sehr oft in der Schweißtechnik angewendete Methode zur Bestimmung des Tropfengewichtes ist außerordentlich langwierig und infolge der hohen Schweißgeschwindigkeit und der Verwendung des von der Elektrode artverschiedenen Grundmaterials unzulässig. Außerdem versagt diese Methode, wenn eine größere Bogenlänge gewählt wird, da hier der Lichtbogen besonders leicht zum Abreißen neigt. Es wurde deshalb eine Meßmethode entwickelt, die den Schweißlichtbogen während des Meßvorganges unberührt und unverfälscht läßt.

Visuelle Beobachtungen während des Schweißvorganges sowie die Auswertung von Zeitlupenfilmen lassen erkennen, daß bei Einhaltung normaler Schweißbedingungen der weitaus größte Teil der Materialübertragung auf das Werkstück unter Kurzschlußbildung erfolgt. Diese Erkenntnis gestattet die Bestimmung des Tropfengewichtes durch die Registrierung der Kurzschlußanzahl. Die Anzahl der Kurzschlüsse, bezogen auf eine Längeneinheit des abgeschmolzenen Elektrodenkerndrahtes, ergibt unter Berücksichtigung der Spritzverluste das mittlere Tropfengewicht. Genauere Aussagen über den Anteil der Materialübertragung, der nicht unter Kurzschlußbildung erfolgt, lassen sich in Ermangelung einer geeigneten Meßmethode nicht treffen. Dieser Anteil wird mit steigender Schweißstromdichte und Bogenlänge größer und führt bei unzulässig hohen Abweichungen von normalen Schweißbedingungen zu falschen Angaben des Tropfengewichtes. Wie groß diese Abweichungen sein können, ist vom Elektrodentyp abhängig und wird durch das Auftreten kurzschlußfreier Tropfen gekennzeichnet.

Die ermittelten Tropfengewichte können also Fehler unbekannter Größe enthalten. Wie die Auswertung von Zeitlupenfilmen zeigt, sind diese Fehler für den ausgewählten Elektrodentyp und die eingehaltenen Schweißparameter klein, da neben den Spritzverlusten kein nennenswerter Anteil des Elektrodenwerkstoffes in Form kurzschlußfreier Tropfen auf das Werkstück übergeht. Eine Gegenüberstellung der Kurzschlußanzahl pro Längeneinheit der Elektrode und der daraus ermittelten Tropfengewichte, die bei Variation des elektrischen Anschlußkreises erreicht werden und auf die Bogenlänge bezogen sind, lassen diese Fehler herausfallen. Die angegebene Meßmethode hat damit An-

spruch auf relative Genauigkeit und ist geeignet, den Einfluß des elektrischen Anschlußkreises auf den Abschmelzcharakter zu belegen.

Es liegt in der Natur der Metallübertragung, daß bei Einhaltung konstanter Schweißparameter die Anzahl der Kurzschlüsse pro Längeneinheit der Elektrode sowie die Kurzschlußzeiten nicht konstant sind. Die verschieden möglichen Ursachen hierfür lassen sich weder im natürlichen Geschehen noch im Experiment voneinander trennen, so daß für sie nur eine statistische Erfassung in Frage kommt. Diese kann grundsätzlich mit Hilfe eines Schleifenzillographen oder einer Zeitlupenkamera vorgenommen werden. Das Zählen der Kurzschlüsse sowie das Ausmessen der Kurzschlußzeiten, die für die untersuchte Elektrode in der Größenordnung von 10^{-3} s liegen, erfordert jedoch eine hinreichende Zeitdehnung des Schweißvorganges, die sowohl beim oszillographischen als auch beim kinematographischen Verfahren einen sehr großen Aufwand an Filmmaterial verlangt und mit einer äußerst langwierigen Auswertung verbunden ist.

Es wurde deshalb ein Kurzzeitmeßgerät entwickelt, das die beim Schweißen auftretenden Kurzschlüsse nach Anzahl und Zeitdauer registriert². Diese Meßmethode hat gegenüber den eingangs erwähnten Methoden den großen Vorteil, daß die Bestimmung des Tropfengewichtes unter völlig normalen Schweißbedingungen vorgenommen werden kann und an keine Verfahrenstechnik und Schweißposition gebunden ist. Speziell im Hinblick auf die Entwicklung einer Elektrodentype, die der angegebenen Verfahrenstechnik zur Veränderung des Abschmelzcharakters besonders leicht zugänglich ist, hat diese Meßmethode eine besondere Bedeutung.

Zur Ermittlung des Tropfengewichtes dürfen jedoch nur Tropfenkurzschlüsse herangezogen werden, bei denen ein Materialtransport stattfindet. Wie die Auswertung der Vorversuche zeigte (s. S. 11 bis 17), ist dies im allgemeinen erst bei Kurzschlußzeiten, deren Dauer durchschnittlich $> 1,5$ ms beträgt, der Fall. Zur Überprüfung dieser Ergebnisse und zur Klärung der Frage, ob jeder Tropfenübergang einer Veränderung durch den elektrischen Anschlußkreis unterliegt, muß es die anzuwendende Meßmethode gestatten, Kurzschlüsse oberhalb jeder gewünschten Kurzschlußzeit zu registrieren.

Versuchs- und Meßanordnung

Den Schaltplan für die Durchführung der Hauptversuche zeigt Bild 22. In den bereits auf den Seiten 11 bis 13 beschriebenen Schweißkreis wird wahlweise eine Induktivität L oder eine Kapazität C mit einem in Serie geschalteten Widerstand R' eingefügt. Der Widerstand R' erhält die Wiederezündung des Lichtbogens nach Tropfenabriß. Sein Mindestwert, der mit Rücksicht auf die Dimensionierung der Kapazität klein zu halten ist, zeigt eine Abhängigkeit vom Elektrodentyp und wird empirisch für die ungünstigsten Schweißbedingungen, d. h. bei kleiner Schweißstromstärke und großer Bogenlänge, ermittelt. Wird die Induktivität L mit dem Lichtbogen in Serie geschaltet (Schweißen mit L), so ist der Ausgleichsvorgang des Stromverlaufes bei vorgegebenem Maschinentyp durch die Induktivität L und den Ohmschen Widerstand $R_{\text{Leitg.}} + R_{\text{Indukt.}}$ des Anschlußkreises charakterisiert. Ist die Kapazität C mit dem in Serie geschalteten

² Das Kurzzeitmeßgerät wurde nach Angaben des Verfassers vom Institut für allgemeine Elektrotechnik der Technischen Hochschule Dresden entwickelt und gebaut.

Widerstand R' parallel zum Lichtbogen geschaltet (Schweißen mit C), so ist die Induktivität L ausgeschaltet, und der den Abschmelzcharakter beeinflussende Stromverlauf wird durch die Kapazität C mit dem in Reihe geschalteten Widerstand R' und dem Ohmschen Widerstand $R_{\text{Leitg.}}$ bestimmt. Die Ohmsche Widerstandskomponente des Kondensators und der induktive Widerstand der Schweißkabel sind vernachlässigbar klein. Der Stromverlauf beim Schweißen mit C ergibt sich während des Tropfenkurzschlusses durch Überlagerung des vom Schweißgenerator gelieferten Stromes und des Entladestromes des Kondensators.

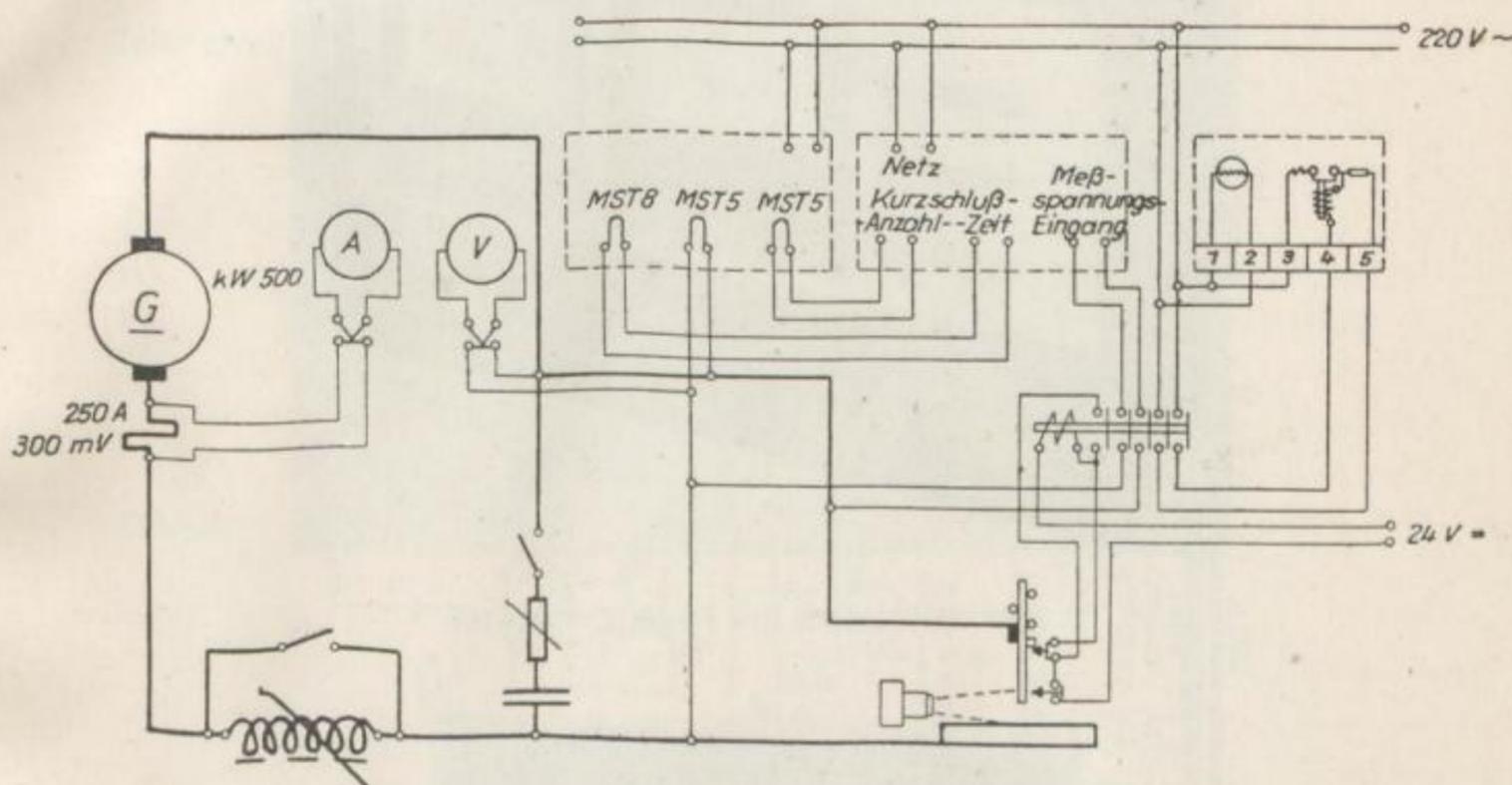


Bild 22. Versuchsanordnung für Hauptversuche

Der Schweißkreis ist bei Verwendung des Schweißumformers vom Typ KW 500 und unter Berücksichtigung der Betriebstemperatur durch nachfolgende Angaben charakterisiert:

Normalschweißung:

Ohmscher Widerstand des Anschlußkreises $R_{\text{Leitg.}} = 0,10 \Omega$;

Schweißen mit L :

Ohmscher Widerstand des Anschlußkreises $R_{\text{Leitg.}} + R_{\text{Indukt.}} = 0,26 \Omega$,

Induktivität der Drossel $L = 0,05 H$ (für $J_s > 40 A$);

Schweißen mit C :

Ohmscher Widerstand des Anschlußkreises $R_{\text{Leitg.}} = 0,10 \Omega$,

Kapazität parallel zur Bogenstrecke $C = 120000 \mu F$,

mit dem Kondensator in Reihe geschalteter Widerstand $R' = 0,15 \Omega$.

Die Zählung und Zeitmessung der während des Schweißvorganges auftretenden Kurzschlüsse werden mit einem in Bild 23 und Bild 24 dargestellten Registriergerät vorgenommen. Unter einem Kurzschluß wird bei der Lichtbogenschweißung verstanden,

daß die Schweißspannung durch Berührung des schmelzflüssigen Elektrodenwerkstoffes mit dem Schmelzbad auf dem Werkstück auf einen Wert zwischen 0 und 10 V zusammenbricht. Diese Spannungsdifferenz kann durch eine Schwellbarkeitsregelung variiert werden. Dadurch ist es möglich, auch den Materialtransport zu erfassen, der bei brennendem Lichtbogen erfolgt. Bei dieser Art von Werkstoffübertragung sinkt die Bogen-

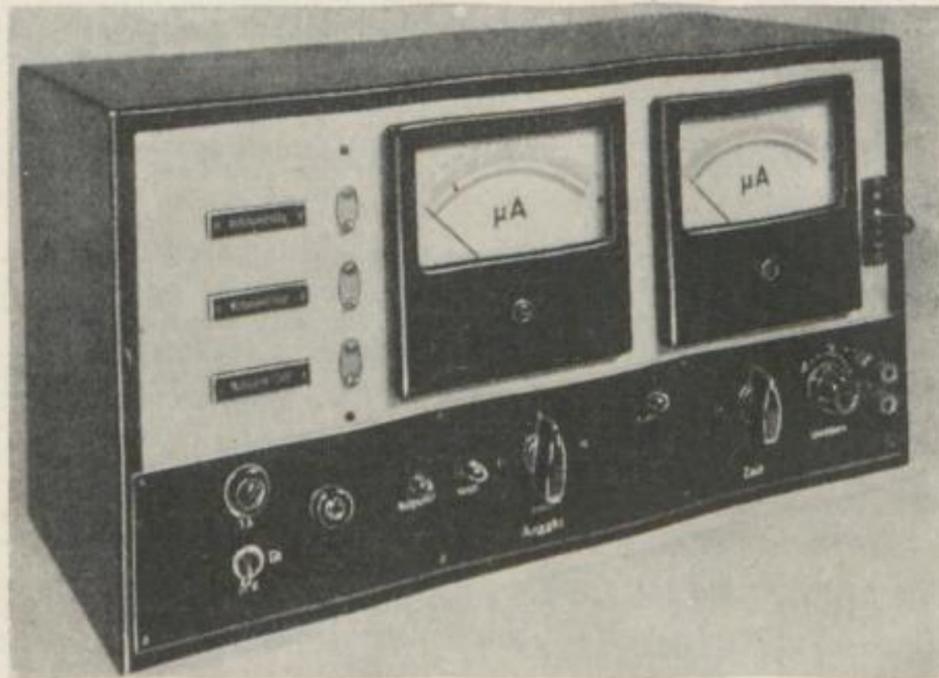


Bild 23. Ansicht des Registriergerätes



Bild 24. Ansicht des Vorsatzgerätes

spannung bei Berührung des flüssigen Elektrodenwerkstoffes mit dem Schmelzbad nicht wie üblicherweise auf einen Spannungswert, wie er durch den Leitungswiderstand des Schweißkreises gegeben ist [32].

Das Registriergerät ist für die Gleich- und Wechselstromschweißung geeignet. Es besteht aus einem Teilgerät für die Gleichstromschweißung, einem Teilgerät für die Wechselstromschweißung und einem Vorsatzgerät für die Einstellung eines Zeitschwellwertes. Den Gesamtschaltplan des Registriergerätes zeigen die Bilder 25 bis 27. Im

nachfolgenden sei die Wirkungsweise des Gerätes bei der Gleichstromschweißung besprochen [40].

Das Teilgerät für die Gleichstromschweißung besteht aus einem Netzteil, einem Zeitmeßteil und einem Zählteil. Unterschreitet die zwischen Elektrode und Schweißgut auftretende Spannung, die an den Eingang des Gerätes gegeben wird, die durch den Schwellwertregler einstellbare Spannung, so wird durch den am Eingang liegenden bistabilen

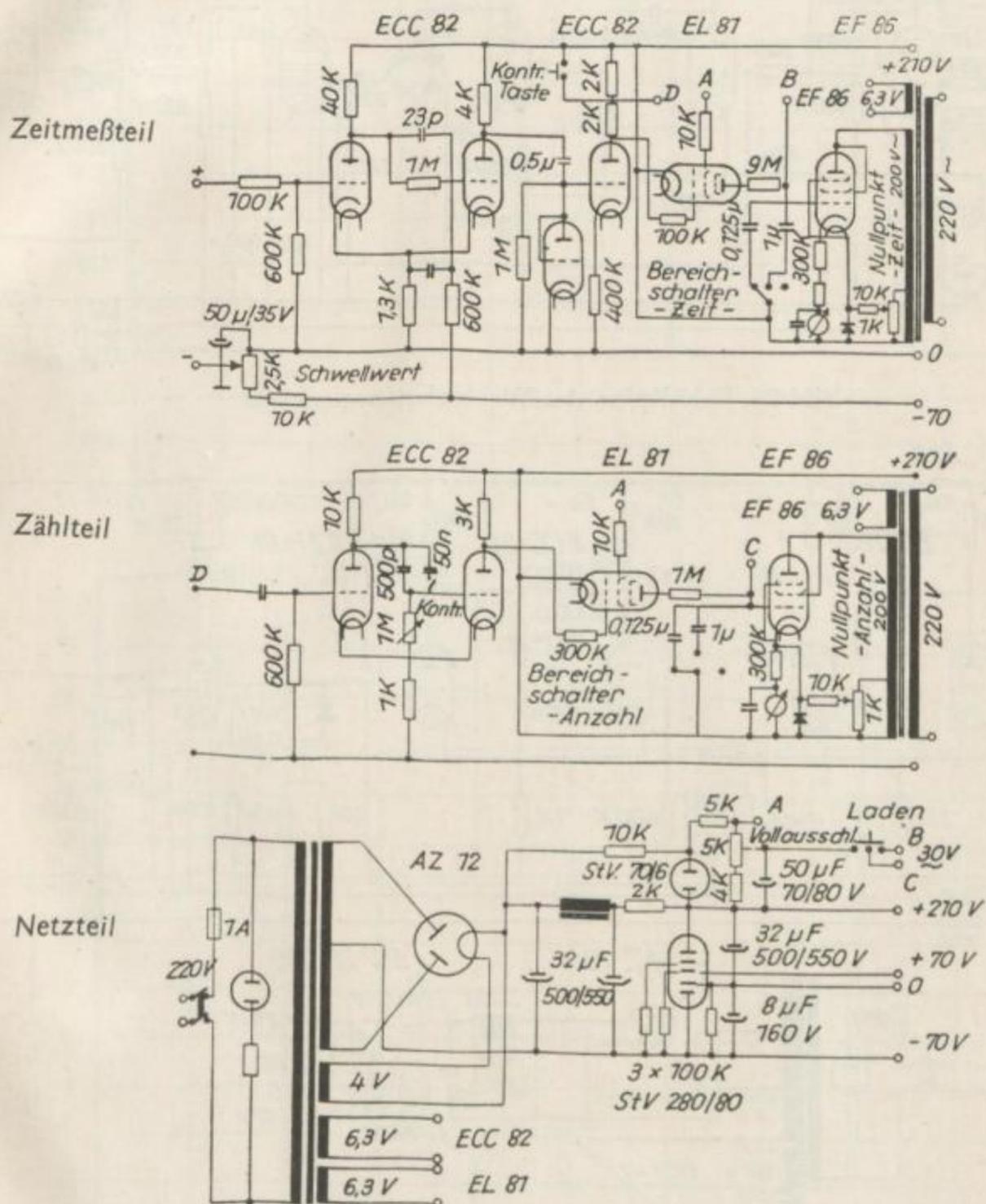


Bild 25. Schaltplan des Gleichspannungsteils

Multivibrator ein Rechteckimpuls erzeugt, dessen Länge gleich der Zeit ist, die die Schweißspannung unterhalb des Schwellwertes bleibt. Der Impuls gelangt an eine Entladeröhre, die während der Zeitdauer des Öffnungsimpulses den Entladeweg eines am Beginn der Messung aufgeladenen Kondensators freigibt. Dabei ist durch geeignete Maßnahmen gewährleistet, daß der Entladewiderstand weitgehend unabhängig von der Höhe des Öffnungsimpulses und von den Röhrenhalterungen ist. Der Spannungszustand

des Kondensators wird durch ein angeschlossenes Gleichspannungsröhrenvoltmeter angezeigt. Die Anzeige des Röhrenvoltmeters gestattet über zwei Meßbereiche und die in Bild 28 und Bild 29 dargestellten Eichkurven die gesamte Kurzschlußzeit zu ermitteln.

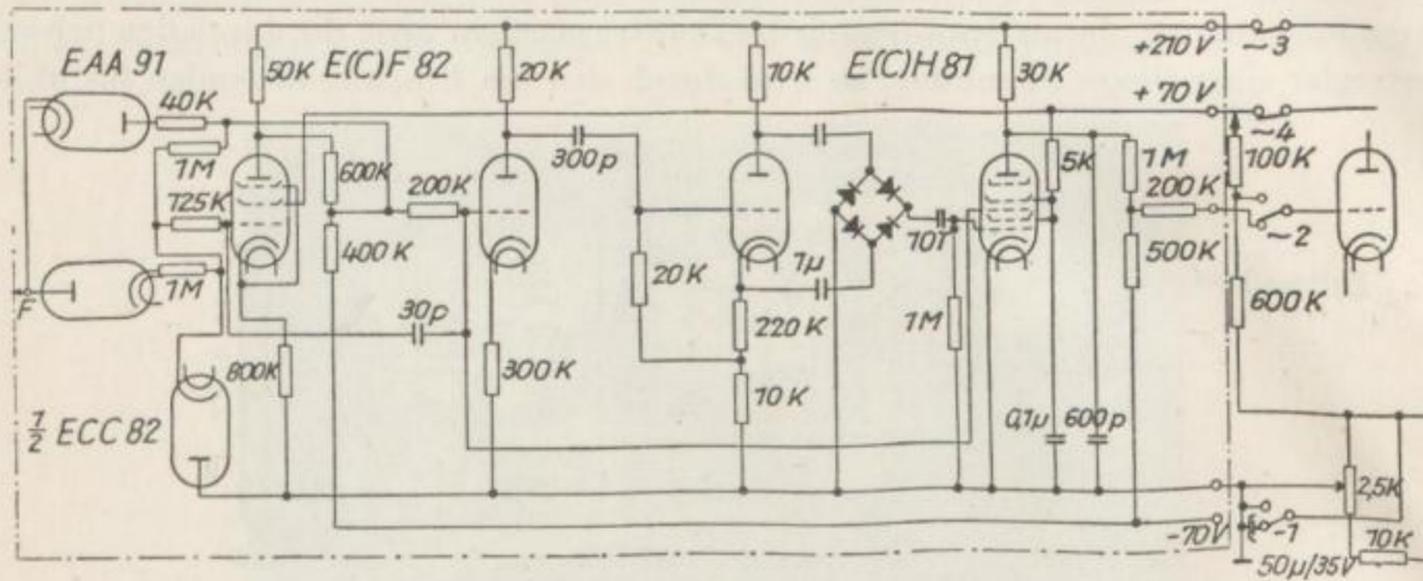


Bild 26. Schaltplan des Wechselspannungsteils

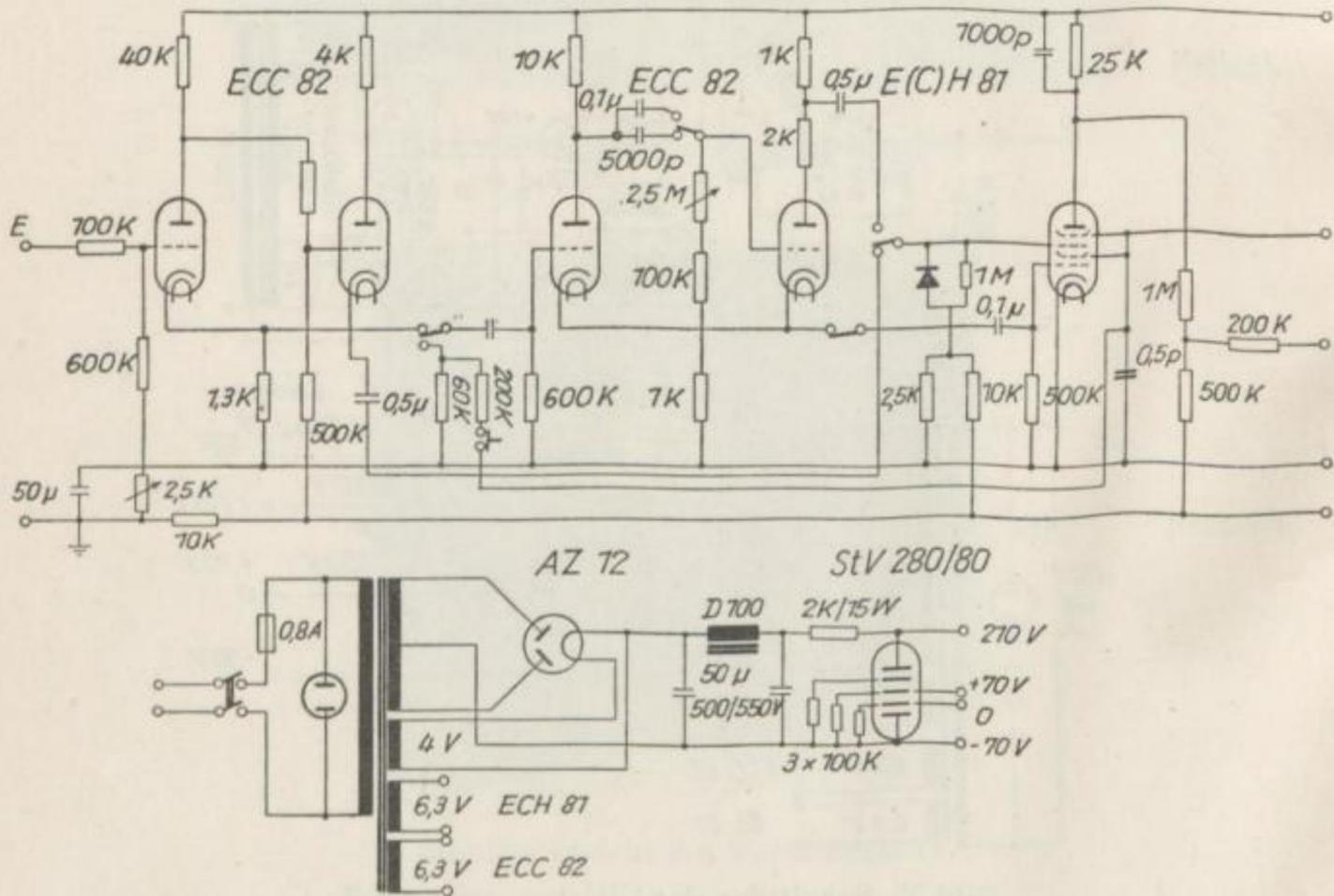


Bild 27. Schaltplan des Vorsatzgerätes

Zur Zählung der auftretenden Kurzschlüsse wird der von einem bistabilen Multivibrator erzeugte Impuls zur Anregung eines zweiten monostabilen Multivibrators benutzt, der je Anregeimpuls einen Impuls konstanter Länge (0,5 ms) erzeugt. Diese konstanten Impulse werden ebenfalls dazu benutzt, über eine Entladeröhre einen Kondensator zu entladen, dessen Spannungszustand wiederum von einem Gleichspannungs-

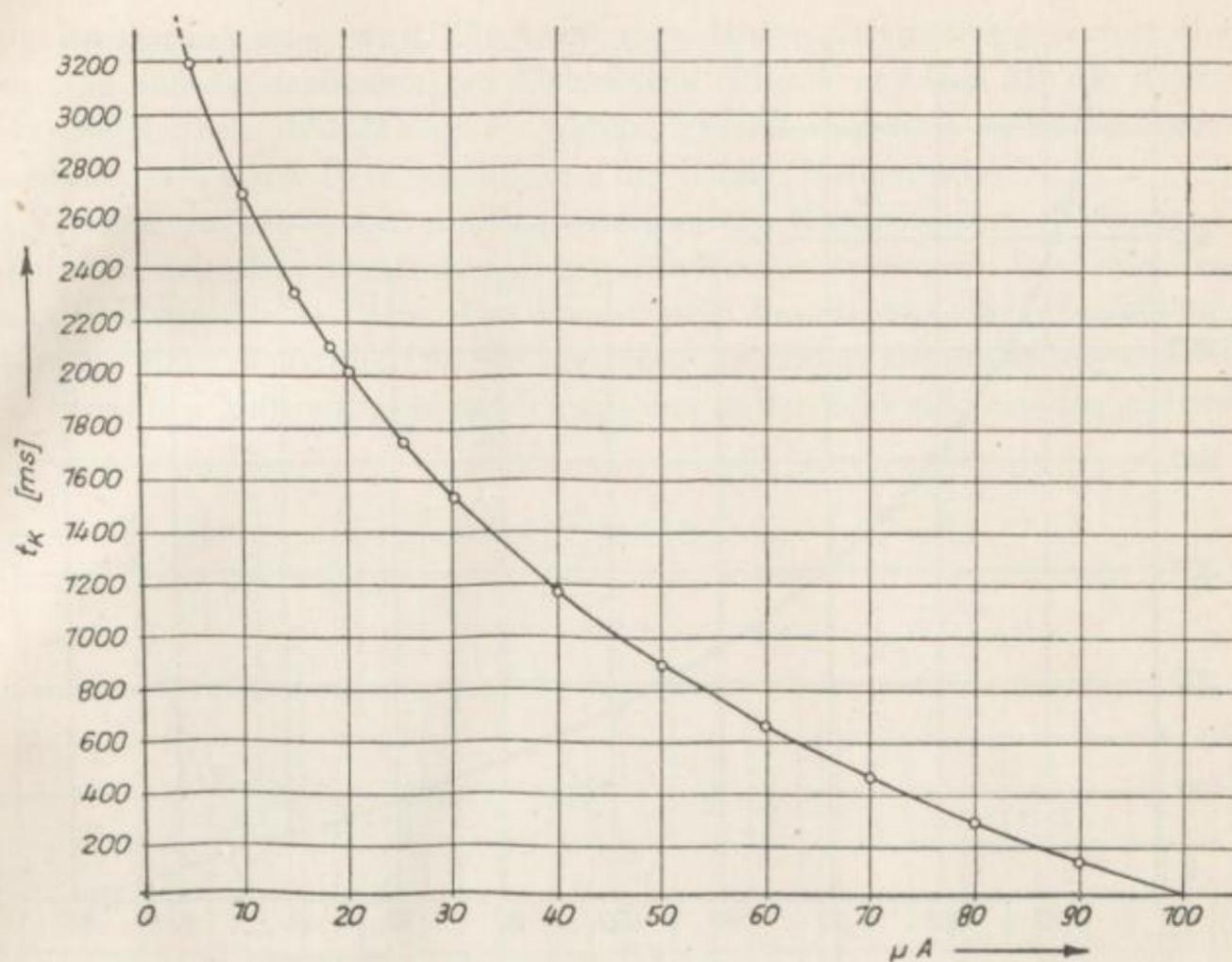


Bild 28. Eichkurve für Kurzschlußzeit — Bereich I

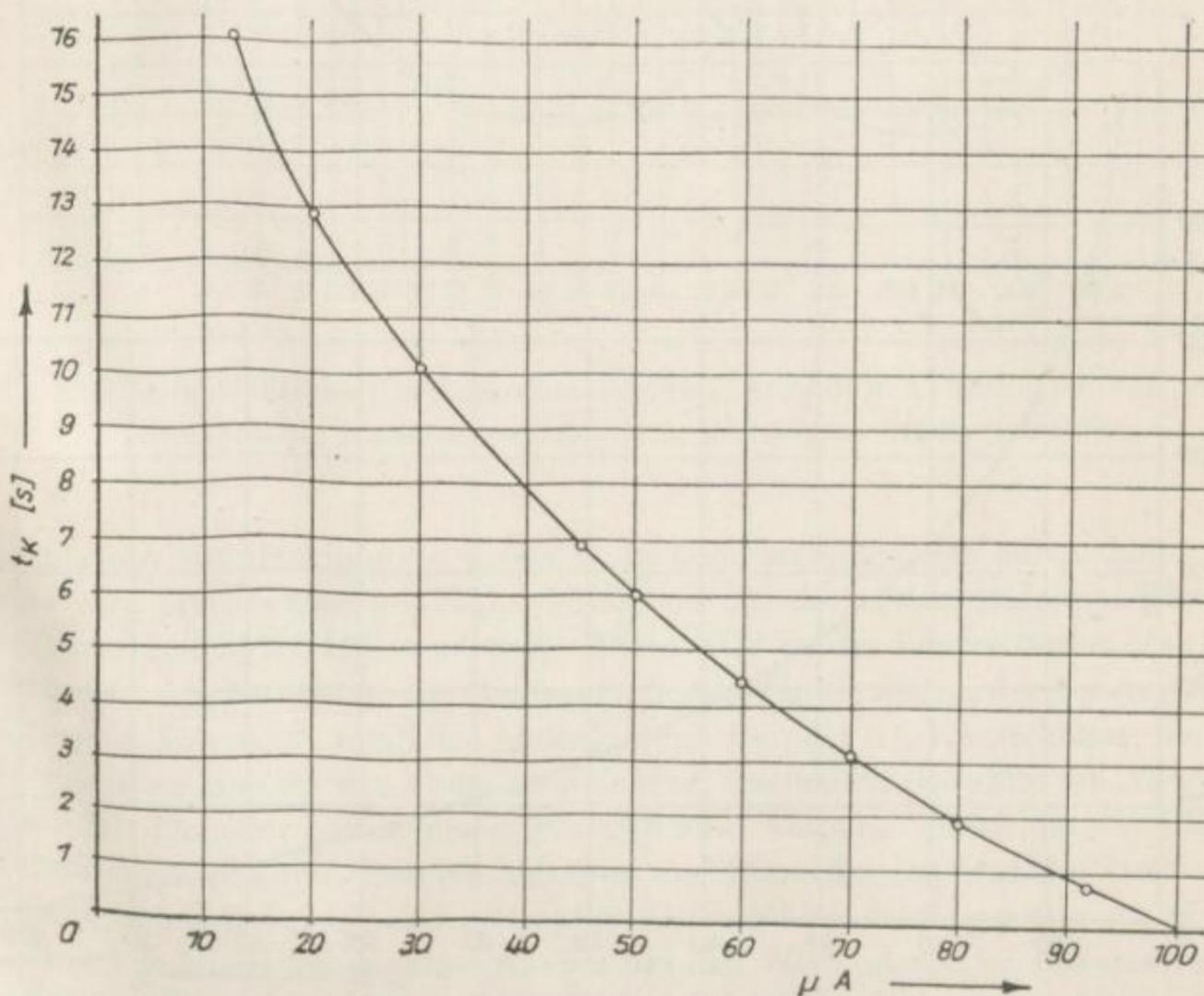


Bild 29. Eichkurve für Kurzschlußzeit — Bereich II

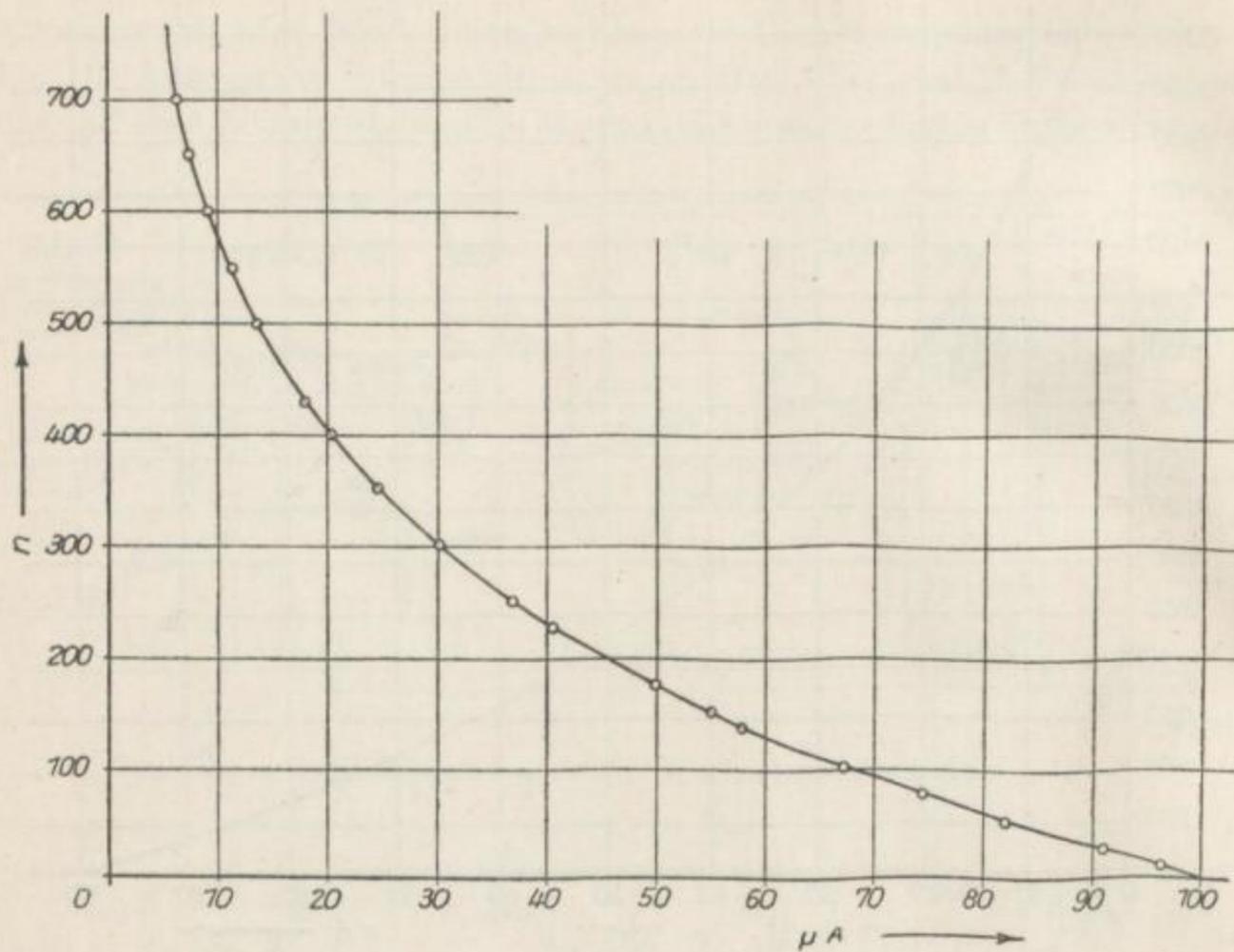


Bild 30. Eichkurve für Kurzschlußanzahl — Bereich I

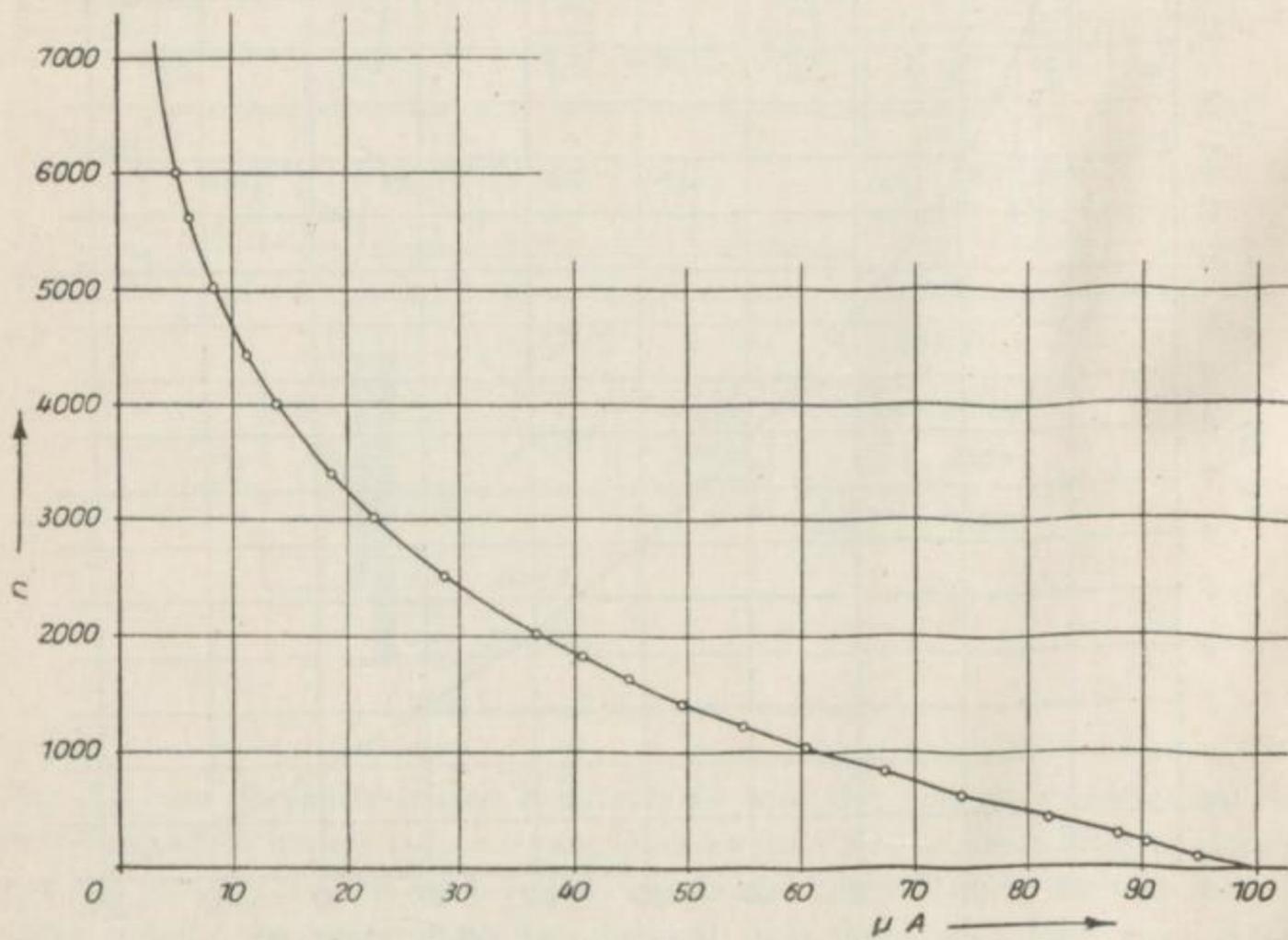


Bild 31. Eichkurve für Kurzschlußanzahl — Bereich II

röhrenvoltmeter angezeigt wird. Die Anzeige des Röhrenvoltmeters gestattet über zwei Meßbereiche und die dazugehörigen Eichkurven (Bild 30 und Bild 31) die Kurzschlußanzahl zu bestimmen. Bild 32 zeigt die Abhängigkeit des maximalen Meßfehlers von der Kurzschlußanzahl unter Berücksichtigung der beiden Meßbereiche.

Das Vorsatzgerät ermöglicht die Registrierung von Kurzschlüssen, die länger als eine bestimmte am Zeitschwellwertregler eingestellte Mindestdauer sind. Der Zeitschwellwert erstreckt sich von 0,5 bis 12 ms. Das Vorsatzgerät besteht aus einem bistabilen Multivibrator und einer Meßstufe. Die Stromversorgung erfolgt aus einem eigenen Netzteil. In dem bistabilen Multivibrator werden aus den in der Schweißspannung auftretenden

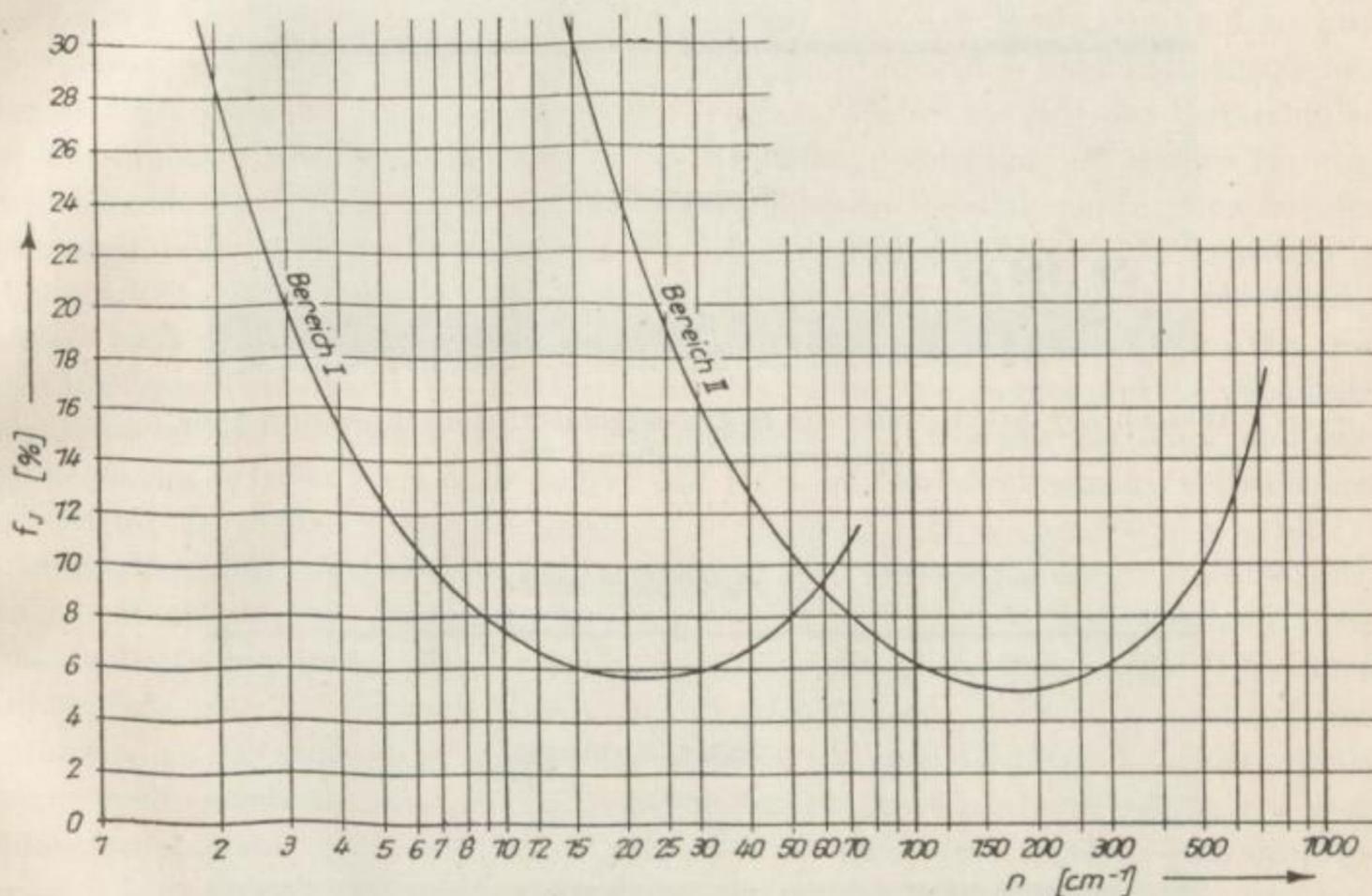


Bild 32. Maximaler Meßfehler des Kurzzeitmeßgerätes (Anzahl) in Abhängigkeit von der Kurzschlußanzahl. Klassengenauigkeit 1,5, Ablesegenauigkeit $\pm 0,5$ Skt

Kurzschlüssen Rechteckimpulse geformt. In dem nachfolgenden monostabilen Multivibrator wird pro Rechteckimpuls, herkommend aus der ersten Stufe, ein Impuls mit einstellbarer definierter Länge erzeugt. Dieser wird in der letzten Stufe des Gerätes, der Meßstufe, den Kurzschlüssen überlagert, in dem Sinne, daß an der Anode der Kurzschluß erst dann erfolgt, wenn der Abdeckimpuls beendet ist. Kurzschlüsse, die kürzer als oder genauso lang wie der Abdeckimpuls sind, erscheinen also nicht am Ausgang des Gerätes. Alle längeren Kurzschlüsse gelangen zum Ausgang jedoch um die Dauer des Abdeckimpulses verkürzt. Bei der Ablesung am Zeitmeßinstrument des Hauptgerätes ist deshalb zu beachten, daß es die Zeit aller Kurzschlüsse, die länger als der eingestellte Schwellwert gedauert haben, anzeigt, aber um den Wert „Anzahl der Kurzschlüsse \times Zeitschwellwert“ zu kurz. Dieser Wert ist der abgelesenen Zeit hinzuzufügen.

Die Arbeitsweise des Registriergerätes wurde mit Hilfe eines Schleifenoszillographen überprüft. Oszillogrammausschnitte bei verschiedenen Zeitschwellwerten zeigen Bild 33 und Bild 34.

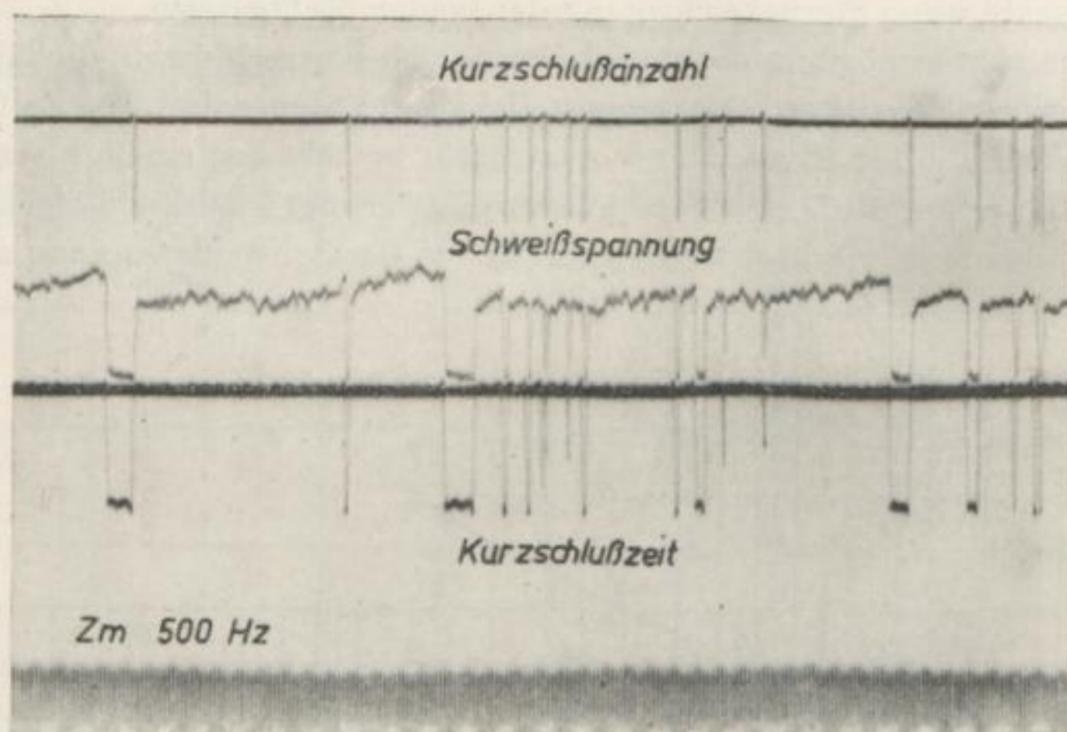


Bild 33. Zur Arbeitsweise des Registriergerätes; Zeitschwellwert 1 ms, Spannungsschwellwert 10 V

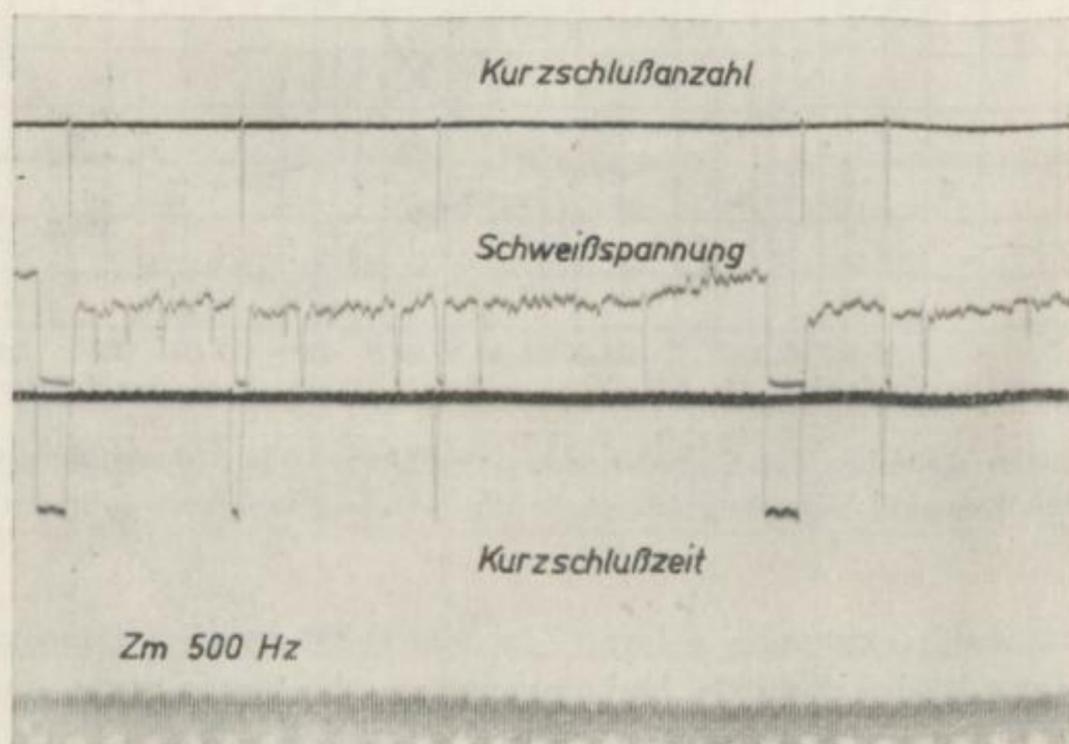


Bild 34. Zur Arbeitsweise des Registriergerätes; Zeitschwellwert 3 ms, Spannungsschwellwert 10V

Mit Rücksicht auf die Versuchsdurchführung und die Widerstandserwärmung der Elektrode erfordert die Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse, daß die Registrierung der beim Schweißen auftretenden Kurzschlüsse für einen definierten Elektrodenabschnitt vorgenommen wird. Diese Aufgabe übernimmt ein Begrenzungsschalter, der durch den Elektrodenvorschubmechanismus des Schweißautomaten betätigt wird und

ein Relais schließt, das die Meßspannung für das Registriergerät freigibt und gleichzeitig einen Zeitmesser, der die Gesamtzeit des Registriervorganges mißt, einschaltet. Der Meßvorgang wird automatisch abgeschaltet, nachdem 100 mm Elektrodenlänge verschweißt sind (s. Bild 22).

Versuchsplan

Aufgabenstellung, Lösungsweg und Vorversuche führten zur Aufstellung nachfolgenden Versuchsplanes; er besteht aus drei Abschnitten:

Im ersten Abschnitt werden die pro Längeneinheit der Elektrode auftretenden Kurzschlüsse nach Anzahl und Zeitdauer bei der Normalschweißung, beim Schweißen mit *L* und beim Schweißen mit *C* ermittelt. Hierbei wird ein Zeitschwellwert von 1 ms und ein Spannungsschwellwert von 10 V zugrunde gelegt. Es werden damit alle möglichen Kurzschlüsse während des Schweißvorganges erfaßt. Da die Anzahl der Kurzschlüsse bei konstanter Schweißstromstärke von der Bogenlänge abhängig ist, werden für eine vergleichende Darstellung des Einflusses der angegebenen Schaltelemente gegenüber der Normalschweißung Betrachtungen über die Veränderung des Abschmelzcharakters in Abhängigkeit der Bogenlänge vorgenommen. Hierbei wird nicht nur der Anschlußkreis, sondern auch die Schweißstromstärke als Parameter gewählt, da sich mit ihrem Wert die Abschmelzgeschwindigkeit, die Energiebilanz des Schmelzvorganges und die chemisch-physikalische Beschaffenheit des schmelzflüssigen Elektrodenwerkstoffes und des Schmelzbades auf dem Werkstück ändert. Mit Rücksicht auf die Versuchsdurchführung (s. S. 41 bis 43) werden Schweißstromstärken von 140 A, 160 A und 190 A gewählt.

Im zweiten Abschnitt wird ein Zeitschwellwert von 3 ms eingestellt, und unter sonst gleichen Bedingungen werden die im ersten Abschnitt durchgeführten Versuchsreihen wiederholt. Damit werden alle Kurzschlüsse nach Anzahl und Zeitdauer erfaßt, deren Kurzschlußzeiten ≥ 3 ms sind. Hierdurch soll geklärt werden, oberhalb welcher Kurzschlußzeit eine Veränderung des Abschmelzcharakters auftritt. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihen sollen die Anwendungsmöglichkeiten der Verfahrenstechnik zur Veränderung des Abschmelzcharakters auf verschiedene Schweißverfahren und Elektrodentypen erkennen lassen. Der Zeitschwellwert von 3 ms wurde auf Grund der Auswertung von Zeitlupenfilmen gewählt (s. S. 11 bis 17), die zeigten, daß unterhalb dieses Wertes kein nennenswerter Anteil des schmelzflüssigen Elektrodenwerkstoffes vom Werkstück aufgenommen wird.

Zur Ermittlung der Größen, die allgemein das Abschmelzen einer Elektrode beschreiben, sind im dritten Abschnitt für die Aufstellung der Energiebilanz des Schmelzvorganges die Abschmelzgeschwindigkeit und die Fläche des aufgeschmolzenen Grundwerkstoffes in Abhängigkeit der Bogenlänge zu bestimmen. Als Versuchsparameter sind die im ersten Abschnitt genannten Schweißstromstärken und der elektrische Anschlußkreis gewählt.

Versuchsdurchführung

Der Ablauf der Versuchsdurchführung ergibt sich auf Grund des aufgestellten Versuchsplanes.

Im ersten und zweiten Abschnitt ist für verschiedene Schweißstromstärken die Kurzschlußanzahl pro Längeneinheit der Elektrode in Abhängigkeit von der Bogenlänge bei

der Normalschweißung, beim Schweißen mit L und beim Schweißen mit C aufgenommen. Die ausgewählten Schweißstromstärken umfassen ein den Belangen der Schweißtechnik angepaßtes Stromintervall. Für Schweißstromstärken < 140 A wird der Lichtbogen beim Schweißen mit C instabil und zündet nach Tropfenabriß nicht mit Sicherheit wieder. Ist die Schweißstromstärke > 190 A, so wird der für den Registriervorgang ausgewählte Elektrodenabschnitt unzulässig hoch erwärmt.

Für die Registrierung der auftretenden Kurzschlüsse nach Anzahl und Zeitdauer wurden Auftragsschweißungen mit der im Schaltplan (Bild 22) dargestellten Versuchsanordnung auf Blechen der Güte MSt 3b ausgeführt. Die Abmessungen der Bleche betragen $280 \times 120 \times 18$ mm. Die Schweißrichtung war durch die maximale Blechabmessung vorgeschrieben. Die Oberfläche der Bleche war gehobelt und zunderfrei. Die Schweißgeschwindigkeit war für alle Versuche $v = 20$ cm/min konstant. Die verwendeten Elektroden vom Typ Ti VII m, 4 mm Durchmesser, hatten eine Länge von 350 mm. Der Registriervorgang schaltete sich selbsttätig ein, nachdem 40 mm Elektrodenlänge verschweißt waren. Diese Länge war erfahrungsgemäß für die Einstellung der Strom-Spannungswerte erforderlich. Der Registriervorgang wurde automatisch abgeschaltet, nachdem 100 mm Elektrodenlänge verschweißt waren. Der Spannungsschwellwert betrug für alle Versuchsreihen 10 V, der Zeitschwellwert 1 ms und 3 ms.

Die Bogenlänge wurde mit Hilfe der Schweißspannung eingestellt. Dies setzte die Kenntnis der funktionellen Abhängigkeit zwischen beiden Größen voraus. Eine vorläufige und richtungweisende Abhängigkeit ergaben Probeschweißungen, bei denen die Bogenlänge mit Hilfe einer Sammellinse auf einen Bildschirm projiziert wurde. Diese Abhängigkeit wurde benutzt, um bei der Registrierung der auftretenden Kurzschlüsse die Einstellung der Bogenlänge mit Hilfe der Schweißspannung vorzunehmen. Die eindeutige Abhängigkeit zwischen der Schweißspannung und der Bogenlänge wurde während des automatisch ausgelösten Registriervorganges photographisch festgelegt. Beim Photographieren des Lichtbogens ist darauf zu achten, daß die optische Achse senkrecht zur Elektrodenachse steht, da der Lichtbogen kegelförmig ausgebildet ist und bei Nichteinhaltung dieser Bedingung kein realer Wert gemessen wird.

Das Verfahren zur Ermittlung der Bogenlänge mit Hilfe der Schweißspannung hat den Vorteil, daß die Einstellung der Schweißspannung als zeitlicher Mittelwert während der Versuchsdauer durch die Verwendung eines Spannungsmessers mit Thermoumformer keine Schwierigkeiten bereitet, dagegen momentane Änderungen der Bogenlänge, die sich insbesondere bei größeren Bogenlängen, bedingt durch den Abschmelzvorgang, nicht vermeiden lassen, die Einregulierung der Elektrode auf einen vorgeschriebenen Sollwert erschweren.

Für die Ermittlung eines jeden Meßpunktes der Versuchsreihen wurden jeweils fünf Elektroden verschweißt und die hierbei auftretenden Kurzschlüsse nach Anzahl und Zeitdauer registriert; die Bogenlänge wurde während eines jeden Registriervorganges photographiert. Die aus den gemessenen Werten gebildeten Mittelwerte sind in den Tabellen 5 bis 16 zusammengestellt.

Für die Aufstellung der Energiebilanz des Schmelzvorganges wurden im dritten Abschnitt entsprechend der in den beiden ersten Abschnitten angewandten Versuchsdurch-

führung Auftragsschweißungen ausgeführt, und bei der Normalschweißung wurde die Querschnittsfläche des aufgeschmolzenen Grundwerkstoffes bestimmt. Für die Ermittlung der Querschnittsfläche wurde für jede Auftragsschweißung nur ein Blech verwendet (Blechmitte). Die Materialentnahme zur Herstellung der Makroschliffe erfolgte jeweils an drei Stellen einer jeden Schweißraupe, und zwar 50 mm, 100 mm und 150 mm vom Anfang der Schweißraupe entfernt.

Versuchsergebnisse

Für einen Zeitschwellwert von 1 ms sind die entsprechend der Versuchsdurchführung ermittelten Werte in den Tabellen 5 bis 13 zusammengestellt. Die Tabellen enthalten gleichzeitig die Ergebnisse einer Fehlerbetrachtung, die die relative Unsicherheit des Mittelwertes der Kurzschlußanzahl [41] sowie die maximale Streuung für jeden Meßpunkt angibt. Eine Erläuterung zu den Tabellen 5 bis 13 schließt sich an. Graphische Belege für die Ergebnisse dieser Versuchsdurchführung sind in den Bildern 35 bis 45 dargestellt.

Die Abhängigkeit der Schweißspannung U_S von der Bogenlänge l_0 zeigt für konstante Schweißstromstärke J_S , daß der Anstieg der Funktion $U_S = f(l_0)$ mit zunehmender Bogenlänge steiler wird, da die Gesamtkurzschlußzeit t_{Kq} pro Längeneinheit der Elektrode verringert wird und sich das Verhältnis von Heizzeit zu Kurzschlußzeit vergrößert (Bilder 35 bis 37). Der Anstieg der Kurven ist nur in geringem Maße vom elektrischen Anschlußkreis abhängig und wird in erster Linie durch die effektive Ionisierungsspannung des Bogengasgemisches und die Schweißstromdichte bestimmt. Mit anwachsender Stromdichte vergrößert sich der Spannungsgradient, da sich die Kurzschlußanzahl pro Zeiteinheit verringert. Bei sprühregenartigem Werkstoffübergang erreicht der Spannungsgradient seinen Endwert. Die Bilder 35 bis 37 begrenzen gleichzeitig das Intervall der Bogenlänge, indem der Werkstoffübergang unter Kurzschlußbildung erfolgen kann. Dieses ist bei vorgegebenem Elektrodentyp von der Schweißstromdichte abhängig. Bedingt durch das Auftreten kurzschlußfreier Tropfen, wird die obere Grenze des Intervalls mit steigender Schweißstromdichte zu kleineren Werten der Bogenlänge verschoben. Auch die untere Grenze des Intervalls verschiebt sich mit steigender Schweißstromdichte zu kleineren Werten der Bogenlänge, da die Bogenstabilität zunimmt. Die Veränderung des Abschmelzcharakters bei Einfügen der angegebenen Schaltelemente in den Schweißkreis führt bei konstanter Bogenlänge zu einer unterschiedlichen Schweißspannung.

Die in den Bildern 38 bis 40 dargestellte Abhängigkeit der Kurzschlußanzahl n von der Bogenlänge l_0 zeigt die Veränderung des Abschmelzcharakters durch den elektrischen Anschlußkreis. Wird mit einem Kondensator, der parallel zur Bogenstrecke geschaltet ist, geschweißt, so erhöht sich die Anzahl der Kurzschlüsse pro Längeneinheit der Elektrode. Eine zusätzlich in den Schweißkreis eingefügte Induktivität führt zu einer Verringerung der Kurzschlußanzahl gegenüber der Normalschweißung bei gleicher Bogenlänge. Mit steigender Bogenlänge wird die Kurzschlußanzahl geringer, da die Nutzleistung des Lichtbogens zum Abschmelzen der Elektrode abnimmt (s. S. 58 bis 68).

Tabelle 5. Mittlere Kurzschlußanzahl n , mittleres Tropfengewicht m und Spritzverluste K in Abhängigkeit von der Bogenlänge l_0
 Elektrode Ti VII m, 4 mm \varnothing Spannungsschwellwert am Registriergerät 10 V Schweißstromstärke $J_S = 140$ A
 Schweißgeschw. $v = 20$ cm/min Zeitschwellwert am Registriergerät 1 ms Schweißung mit Induktivität
 (hierzu s. Erläuterung S. 50 und Bilder 35 bis 45)

U_S [V]	l_0 [mm]	t_S [s]	t_{Kg} [s]	t_K [10^{-3} s]	w [cm/s]	n [cm^{-1}]	K [%]	m [10^{-2} g]
19,50	2,40	25,03	4,259	4,58	0,399	93,4	4,6	9,9
20,25	3,60	26,78	3,236	4,75	0,376	68,1	6,9	13,3
21,35	5,10	28,52	2,112	5,04	0,351	41,9	10,0	20,8
22,40	6,25	29,86	2,038	7,66	0,335	26,6	12,8	33,4
23,40	7,25	30,86	1,068	8,47	0,324	12,6	15,6	64,7

n_{\min} [cm^{-1}]	$\frac{n_{\min}-n}{n} \cdot 100\%$	n_{\max} [cm^{-1}]	$\frac{n_{\max}-n}{n} \cdot 100\%$	σ_D [%]	f_J [%]	n'_L [cm^{-1}]	$\frac{n'_L}{n'_N} \cdot 100\%$	$\frac{n'_C}{n'_N} \cdot 100\%$
78,0	-16,5	104,0	+11,4	$\pm 2,76$	$\pm 6,9$	93,4	94,5	—
50,5	-25,8	88,0	+29,2	$\pm 7,31$	$\pm 8,3$	68,1	81,5	—
40,0	-4,5	45,0	+9,3	$\pm 3,42$	$\pm 6,5$	41,9	76,5	—
22,9	-13,9	30,2	+13,5	$\pm 4,10$	$\pm 5,5$	25,3	78,0	—
9,7	-23,0	16,0	+27,0	$\pm 5,29$	$\pm 6,7$	12,6	69,0	—

Hauptversuche

Tabelle 6.

Normalschweißung

U_S [V]	l_0 [mm]	t_S [s]	t_{Kg} [s]	t_K [10^{-3} s]	w [cm/s]	n [cm^{-1}]	K [%]	m [10^{-2} g]
19,35	2,25	25,71	3,874	3,38	0,389	113,8	2,8	8,3
20,10	3,60	27,72	3,044	3,58	0,361	85,0	5,1	11,0
20,80	4,75	28,80	2,348	3,82	0,347	61,5	7,3	14,7
22,00	6,30	30,96	1,910	5,56	0,324	34,3	10,8	26,1
22,90	7,25	31,50	0,920	5,02	0,318	18,3	13,2	46,0

n_{\min} [cm^{-1}]	$\frac{n_{\min}-n}{n} \cdot 100\%$	n_{\max} [cm^{-1}]	$\frac{n_{\max}-n}{n} \cdot 100\%$	σ_D [%]	f_J [%]	n'_N [cm^{-1}]	$\frac{n'_L}{n'_N} \cdot 100\%$	$\frac{n'_C}{n'_N} \cdot 100\%$
110,0	-3,3	116,5	+2,4	$\pm 1,08$	$\pm 6,1$	113,8	—	—
81,0	-4,7	94,0	+10,6	$\pm 3,08$	$\pm 7,4$	83,7	—	—
53,0	-13,8	69,5	+13,0	$\pm 1,99$	$\pm 8,8$	61,5	—	—
32,7	-4,7	36,6	+6,7	$\pm 3,38$	$\pm 5,7$	33,3	—	—
13,6	-25,7	23,7	+29,0	$\pm 4,47$	$\pm 5,8$	18,9	—	—

Tabelle 7.

Schweißung mit Kondensator

U_S [V]	l_0 [mm]	t_S [s]	t_{Kg} [s]	t_K [10^{-3} s]	w [cm/s]	n [cm^{-1}]	K [%]	m [10^{-2} g]
19,35	2,75	27,13	3,293	2,57	0,369	128,0	3,3	7,3
19,65	3,35	27,93	3,269	2,99	0,358	109,3	4,2	8,4
20,40	4,60	29,50	2,364	3,23	0,339	79,1	6,4	11,5
21,40	6,00	30,75	1,618	3,46	0,325	46,8	9,3	19,0
22,50	7,30	31,76	0,730	3,74	0,315	19,5	12,3	43,6

n_{\min} [cm^{-1}]	$\frac{n_{\min}-n}{n} \cdot 100\%$	n_{\max} [cm^{-1}]	$\frac{n_{\max}-n}{n} \cdot 100\%$	σ_D [%]	f_J [%]	n'_C [cm^{-1}]	$\frac{n'_L}{n'_N} \cdot 100\%$	$\frac{n'_C}{n'_N} \cdot 100\%$
113,0	-11,7	148,0	+15,6	$\pm 3,72$	$\pm 5,8$	128,0	—	125,5
104,0	-4,8	116,5	+6,6	$\pm 2,03$	$\pm 6,2$	111,0	—	125,0
61,5	-22,2	97,0	+22,6	$\pm 3,16$	$\pm 7,7$	79,1	—	124,0
37,5	-19,9	57,6	+23,1	$\pm 6,36$	$\pm 7,1$	46,8	—	121,5
19,3	-1,0	19,8	+1,5	$\pm 0,63$	$\pm 5,7$	19,5	—	113,0

Versuchsergebnisse

45

Tabelle 8. Mittlere Kurzschlußanzahl n , mittleres Tropfengewicht m und Spritzverluste K in Abhängigkeit von der Bogenlänge l_0

Elektrode Ti VII m, 4 mm \varnothing
Schweißgeschw. $v = 20$ cm/min

Spannungsschwellwert am Registriergerät 10 V
Zeitschwellwert am Registriergerät 1 ms

Schweißstromstärke $J_S = 160$ A
Schweißung mit Induktivität

(hierzu s. Erläuterung S. 50 und Bilder 35 bis 45)

U_S [V]	l_0 [mm]	t_S [s]	t_{Kq} [s]	$t_K [10^{-3} \text{ s}]$	w [cm/s]	n [cm $^{-1}$]	K [%]	m [10^{-3} g]
19,25	1,85	21,67	—	—	0,461	116,5	5,6	7,8
19,75	2,60	23,35	3,770	4,15	0,428	91,0	8,2	9,9
21,20	3,90	25,71	2,345	4,21	0,389	55,7	13,5	15,3
22,15	4,70	26,68	1,866	4,93	0,375	37,8	17,2	21,7
23,25	5,40	27,45	1,217	5,29	0,364	23,0	20,9	32,5
24,25	6,05	27,98	0,648	5,73	0,358	11,3	24,7	59,0

n_{\min} [cm $^{-1}$]	$\frac{n_{\min}-n}{n} \cdot 100\%$	n_{\max} [cm $^{-1}$]	$\frac{n_{\max}-n}{n} \cdot 100\%$	σ_D [%]	f_J [%]	n'_L [cm $^{-1}$]	$\frac{n'_L}{n'_Y} \cdot 100\%$	$\frac{n'_C}{n'_Y} \cdot 100\%$
113,0	- 3,0	120,0	+ 3,0	$\pm 1,24$	$\pm 6,1$	116,5	85,0	—
88,0	- 3,3	94,0	+ 3,3	$\pm 1,35$	$\pm 7,0$	91,0	86,0	—
48,5	- 12,9	63,5	+ 14,0	$\pm 7,79$	$\pm 9,6$	55,0	86,0	—
36,6	- 3,2	39,0	+ 3,2	$\pm 1,30$	$\pm 6,0$	37,0	83,0	—
19,8	- 13,9	27,8	+ 20,9	$\pm 6,55$	$\pm 5,3$	23,0	78,0	—
10,0	- 11,5	13,6	+ 20,3	$\pm 5,52$	$\pm 7,1$	11,3	64,5	—

Hauptversuche

Tabelle 9.

Normalschweißung

U_S [V]	l_0 [mm]	t_S [s]	t_{Kq} [s]	$t_K [10^{-3} \text{ s}]$	w [cm/s]	n [cm $^{-1}$]	K [%]	m [10^{-3} g]
19,00	1,95	22,39	4,758	3,61	0,446	132,0	4,7	7,0
19,50	2,50	23,90	3,692	3,03	0,418	121,7	6,2	8,3
20,60	3,60	25,78	2,256	3,10	0,388	72,7	9,6	12,1
21,30	4,20	27,16	2,025	3,82	0,368	53,0	11,7	15,3
22,00	4,75	27,85	1,860	4,10	0,359	45,4	13,6	19,2
23,25	5,65	28,17	0,896	3,69	0,354	24,3	17,1	32,2
24,25	6,35	28,93	0,566	4,78	0,346	11,6	20,1	63,3

n_{\min} [cm $^{-1}$]	$\frac{n_{\min}-n}{n} \cdot 100\%$	n_{\max} [cm $^{-1}$]	$\frac{n_{\max}-n}{n} \cdot 100\%$	σ_D [%]	f_J [%]	n'_Y [cm $^{-1}$]	$\frac{n'_L}{n'_Y} \cdot 100\%$	$\frac{n'_C}{n'_Y} \cdot 100\%$
128,0	- 3,0	136,0	+ 3,0	$\pm 1,36$	$\pm 5,7$	132,0	—	—
116,5	- 4,3	128,0	+ 5,2	$\pm 1,62$	$\pm 6,2$	109,0	—	—
64,0	- 12,1	81,0	+ 11,6	$\pm 3,09$	$\pm 8,0$	72,7	—	—
53,0	± 0	53,0	± 0	± 0	$\pm 8,1$	56,0	—	—
42,9	- 5,5	47,4	+ 4,4	$\pm 2,90$	$\pm 6,8$	43,3	—	—
21,0	- 13,6	29,3	+ 20,6	$\pm 6,20$	$\pm 5,3$	24,3	—	—
9,3	- 19,8	14,5	+ 25,0	$\pm 8,74$	$\pm 7,0$	11,6	—	—

Tabelle 10.

Schweißung mit Kondensator

U_S [V]	l_0 [mm]	t_S [s]	t_{Kq} [s]	$t_K [10^{-3} \text{ s}]$	w [cm/s]	n [cm $^{-1}$]	K [%]	m [10^{-3} g]
18,75	2,00	23,42	4,058	2,36	0,427	172,4	4,7	5,4
20,00	3,35	26,27	2,414	2,20	0,380	109,3	8,0	8,2
21,50	4,75	28,10	1,985	2,42	0,356	60,3	12,0	14,2
22,85	5,75	27,99	0,858	2,73	0,357	31,4	15,0	26,0
23,85	6,40	29,31	0,588	2,56	0,341	23,0	17,2	49,0

n_{\min} [cm $^{-1}$]	$\frac{n_{\min}-n}{n} \cdot 100\%$	n_{\max} [cm $^{-1}$]	$\frac{n_{\max}-n}{n} \cdot 100\%$	σ_D [%]	f_J [%]	n'_C [cm $^{-1}$]	$\frac{n'_L}{n'_Y} \cdot 100\%$	$\frac{n'_C}{n'_Y} \cdot 100\%$
160,0	- 7,2	184,0	+ 6,7	$\pm 2,56$	$\pm 5,4$	172,4	—	133,0
100,5	- 8,1	113,0	+ 3,4	$\pm 2,11$	$\pm 6,2$	109,3	—	137,0
59,0	- 2,2	61,5	+ 2,0	$\pm 1,20$	$\pm 9,0$	60,3	—	139,0
30,2	- 3,8	34,6	+ 10,2	$\pm 2,73$	$\pm 5,4$	31,4	—	137,0
20,6	- 10,9	26,3	+ 14,3	$\pm 4,60$	$\pm 5,8$	16,0	—	141,5

Versuchsergebnisse

47

Tabelle 11. Mittlere Kurzschlußanzahl n , mittleres Tropfengewicht m und Spritzverluste K in Abhängigkeit von der Bogenlänge l_0

Elektrode Ti VII m, 4 mm \varnothing
Schweißgeschw. $v = 20$ cm/min

Spannungsschwellwert am Registriergerät 10 V
Zeitschwellwert am Registriergerät 1 ms

Schweißstromstärke $J_S = 190$ A
Schweißung mit Induktivität

(hierzu s. Erläuterung S. 50 und Bilder 35 bis 45)

U_S [V]	l_0 [mm]	t_S [s]	t_{Kg} [s]	t_K [10^{-3} s]	w [cm/s]	n [cm^{-1}]	K [%]	m [10^{-3} g]
19,35	1,50	18,27	3,705	3,04	0,546	121,8	4,0	7,6
20,30	2,20	19,71	2,861	3,24	0,507	88,3	9,1	10,4
21,40	2,90	21,16	1,932	3,37	0,473	57,3	15,0	14,6
22,20	3,30	23,24	1,297	3,42	0,430	43,7	18,9	17,9
24,65	4,30	23,15	0,454	3,49	0,432	13,0	30,5	53,0

n_{\min} [cm^{-1}]	$\frac{n_{\min}-n}{n} \cdot 100\%$	n_{\max} [cm^{-1}]	$\frac{n_{\max}-n}{n} \cdot 100\%$	σ_D [%]	f_J [%]	n'_L [cm^{-1}]	$\frac{n'_L}{n'_N} \cdot 100\%$	$\frac{n'_C}{n'_N} \cdot 100\%$
94,0	-22,8	140,0	+15,0	$\pm 7,13$	$\pm 5,9$	121,8	83,5	—
72,0	-18,5	97,0	+9,9	$\pm 4,19$	$\pm 7,2$	86,3	78,0	—
48,5	-15,4	69,5	+21,3	$\pm 7,30$	$\pm 9,1$	58,7	73,0	—
32,5	-25,6	61,5	+40,7	$\pm 9,51$	$\pm 6,8$	44,3	69,0	—
10,0	-23,1	16,4	+26,1	$\pm 7,96$	$\pm 6,7$	13,0	48,5	—

Tabelle 12.

Normalschweißung

U_S [V]	l_0 [mm]	t_S [s]	t_{Kg} [s]	t_K [10^{-3} s]	w [cm/s]	n [cm^{-1}]	K [%]	m [10^{-3} g]
19,30	1,60	19,47	3,900	2,79	0,514	140,0	4,5	6,6
20,25	2,45	21,09	2,892	2,72	0,475	106,6	9,5	9,1
21,25	3,10	22,01	2,412	3,29	0,455	72,8	13,5	12,2
22,25	3,65	23,52	1,443	2,95	0,425	48,9	17,0	16,7
25,25	4,75	23,88	0,245	2,40	0,418	10,2	24,5	61,5

n_{\min} [cm^{-1}]	$\frac{n_{\min}-n}{n} \cdot 100\%$	n_{\max} [cm^{-1}]	$\frac{n_{\max}-n}{n} \cdot 100\%$	σ_D [%]	f_J [%]	n'_N [cm^{-1}]	$\frac{n'_L}{n'_N} \cdot 100\%$	$\frac{n'_C}{n'_N} \cdot 100\%$
132,0	-5,7	144,0	+2,9	$\pm 2,86$	$\pm 5,7$	140,0	—	—
97,0	-9,0	116,5	+9,3	$\pm 2,06$	$\pm 6,6$	99,0	—	—
64,0	-12,1	78,0	+7,1	$\pm 3,29$	$\pm 8,0$	71,7	—	—
36,6	-25,2	60,5	+23,7	$\pm 5,88$	$\pm 7,7$	50,3	—	—
7,0	-31,4	15,5	+52,0	$\pm 10,03$	$\pm 7,3$	10,2	—	—

Tabelle 13.

Schweißung mit Kondensator

U_S [V]	l_0 [mm]	t_S [s]	t_{Kg} [s]	t_K [10^{-3} s]	w [cm/s]	n [cm^{-1}]	K [%]	m [10^{-3} g]
19,25	1,75	20,60	3,250	2,04	0,485	159,8	4,2	5,8
20,25	2,65	21,97	2,135	2,02	0,457	105,7	8,8	8,6
21,25	3,30	22,16	2,030	2,72	0,442	75,3	12,2	11,6
22,25	3,85	23,25	1,100	2,38	0,430	46,3	15,2	16,2
22,80	4,15	23,53	0,980	2,36	0,425	41,6	17,0	20,5
25,00	4,95	23,37	0,202	2,15	0,428	9,4	21,9	81,4

n_{\min} [cm^{-1}]	$\frac{n_{\min}-n}{n} \cdot 100\%$	n_{\max} [cm^{-1}]	$\frac{n_{\max}-n}{n} \cdot 100\%$	σ_D [%]	f_J [%]	n'_C [cm^{-1}]	$\frac{n'_L}{n'_N} \cdot 100\%$	$\frac{n'_C}{n'_N} \cdot 100\%$
152,0	-4,9	179,0	+12,0	$\pm 3,15$	$\pm 5,5$	159,8	—	120,5
97,0	-8,2	120,0	+13,5	$\pm 3,30$	$\pm 6,3$	104,7	—	115,5
67,0	-11,0	84,5	+12,2	$\pm 4,98$	$\pm 7,8$	75,3	—	118,0
45,8	-1,1	47,4	+2,4	$\pm 1,15$	$\pm 8,1$	52,5	—	123,0
37,5	-9,9	45,8	+10,1	$\pm 9,95$	$\pm 6,3$	40,7	—	127,0
7,3	-22,4	12,0	+27,7	$\pm 8,90$	$\pm 7,8$	9,4	—	195,0

Erläuterung zu den Tabellen 5 bis 13

U_S [V]	Schweißspannung
l_0 [mm]	Bogenlänge
t_S [s]	Abschmelzzeit für 10 cm Elektrodenlänge
t_{Kg} [s]	Gesamtkurzschlußzeit für 10 cm Elektrodenlänge
t_K [10^{-3} s]	mittlere Kurzschlußzeit
w [cm/s]	Abschmelzgeschwindigkeit
n [cm^{-1}]	mittlere Kurzschlußanzahl für 1 cm Elektrodenlänge
K [%]	Spritzverluste
m [10^{-3} g]	mittleres Tropfengewicht
n_{\min} [cm^{-1}]	kleinste gemessene Kurzschlußanzahl für 1 cm Elektrodenlänge
$\frac{n_{\min} - n}{n} \cdot 100$ [%]	prozentuale Abweichung vom Mittelwert
n_{\max} [cm^{-1}]	größte gemessene Kurzschlußanzahl für 1 cm Elektrodenlänge
$\frac{n_{\max} - n}{n} \cdot 100$ [%]	prozentuale Abweichung vom Mittelwert
σ_D [%]	relative Unsicherheit
f_J [%]	maximaler Meßfehler
n'_N [cm^{-1}]	mittlere Kurzschlußanzahl aus der Funktion $n = f(l_0)$ bei Normalschweißung
n'_L [cm^{-1}]	mittlere Kurzschlußanzahl aus der Funktion $n = f(l_0)$ beim Schweißen mit L
n'_C [cm^{-1}]	mittlere Kurzschlußanzahl aus der Funktion $n = f(l_0)$ beim Schweißen mit C
$\frac{n'_L}{n'_N} \cdot 100$ [%]	prozentuale Änderung der Kurzschlußanzahl beim Schweißen mit L , bezogen auf die Normalschweißung ($n'_N = 100$ %)
$\frac{n'_C}{n'_N} \cdot 100$ [%]	prozentuale Änderung der Kurzschlußanzahl beim Schweißen mit C , bezogen auf die Normalschweißung ($n'_N = 100$ %)

Bild 41 veranschaulicht den möglichen Regelbereich, in dem eine Veränderung des Abschmelzcharakters erzielt werden kann, und gibt die erreichbare prozentuale Änderung der Kurzschlußanzahl (gleiche Bogenlänge zugrunde gelegt), bezogen auf die Normalschweißung, die gleich 100% gesetzt wird, an. Für diese Darstellung in Bild 41 wurden außer den Werten, die das Bogenlängenintervall begrenzen, nur ganzzahlige Werte der Bogenlänge gewählt. Da die Kurzschlußanzahl mit zunehmender Bogenlänge abnimmt, kann eine Streuung der Meßwerte n und l_0 bei größeren Bogenlängen zu einem erheblichen Fehler bei der Ermittlung der prozentualen Änderung der Kurzschlußanzahl führen (s. Tabelle 13, $\frac{n'_C}{n'_N} = 195\%$).

Die in Bild 42 vorgenommene Darstellung zeigt, daß sich die durch L und C erzielte Veränderung des Abschmelzcharakters teilweise auch durch eine Änderung der Schweißstromstärke erreichen läßt.

Das mittlere Tropfengewicht verhält sich in Abhängigkeit der Bogenlänge unter Berücksichtigung der in den Tabellen 5 bis 13 aufgeführten Spritzverluste entsprechend der pro Längeneinheit auftretenden Kurzschlußanzahl (Bilder 43 bis 45).

Für einen Zeitschwellwert von 3 ms sind die Versuchsergebnisse in den Tabellen 14 bis 16 zusammengestellt, und die Anzahl der Kurzschlüsse pro Längeneinheit der Elektrode in Abhängigkeit von der Bogenlänge ist in Bild 46 dargestellt. Die Kurzschlußanzahl ist unabhängig vom elektrischen Anschlußkreis, d. h., der Abschmelzcharakter der Elektrode wird nicht beeinflusst.

Die Meßergebnisse zur Aufstellung der Energiebilanz werden auf den Seiten 61 bis 67 aufgeführt.

Tabelle 14. Mittlere Kurzschlußanzahl n in Abhängigkeit von der Bogenlänge l_0

Elektrode Ti VII m, 4 mm \varnothing , Schweißgeschw. $v = 20$ cm/min			Spannungsschwellwert am Registriergerät 10 V, Zeitschwellwert am Registriergerät 3 ms			Schweißstromstärke $J_S = 140$ A (hierzu Bild 46)		
Schweißung mit Induktivität			Normalschweißung			Schweißung mit Kapazität		
U_S [V]	l_0 [mm]	n [cm ⁻¹]	U_S [V]	l_0 [mm]	n [cm ⁻¹]	U_S [V]	l_0 [mm]	n [cm ⁻¹]
18,90	1,80	28,6	18,50	2,05	33,9	19,20	2,40	29,4
20,15	3,50	20,4	19,75	3,00	24,1	20,40	4,60	15,4
21,15	4,90	10,9	20,80	4,85	12,8	21,40	6,00	7,5
22,30	6,15	6,6	21,90	6,15	7,5	22,35	7,15	5,5
23,15	7,00	4,5	22,85	7,00	3,7	—	—	—

Tabelle 15. Mittlere Kurzschlußanzahl n in Abhängigkeit von der Bogenlänge l_0

Elektrode Ti VII m, 4 mm \varnothing , Schweißgeschw. $v = 20$ cm/min			Spannungsschwellwert am Registriergerät 10 V, Zeitschwellwert am Registriergerät 3 ms			Schweißstromstärke $J_S = 160$ A (hierzu Bild 46)		
Schweißung mit Induktivität			Normalschweißung			Schweißung mit Kapazität		
U_S [V]	l_0 [mm]	n [cm ⁻¹]	U_S [V]	l_0 [mm]	n [cm ⁻¹]	U_S [V]	l_0 [mm]	n [cm ⁻¹]
19,85	2,55	22,6	19,35	2,35	26,9	19,10	2,45	30,7
21,50	4,20	10,8	20,70	3,80	13,1	20,05	3,45	15,3
22,40	4,80	7,8	22,00	4,90	8,4	21,45	4,75	7,8
23,00	5,30	5,6	23,15	5,70	5,3	22,70	5,65	4,0
24,30	6,05	3,8	24,15	6,30	3,2	23,80	6,35	2,7

Tabelle 16. Mittlere Kurzschlußanzahl n in Abhängigkeit von der Bogenlänge l_0

Elektrode Ti VII m, 4 mm \varnothing , Schweißgeschw. $v = 20$ cm/min			Spannungsschwellwert am Registriergerät 10 V, Zeitschwellwert am Registriergerät 3 ms			Schweißstromstärke $J_S = 190$ A (hierzu Bild 46)		
Schweißung mit Induktivität			Normalschweißung			Schweißung mit Kapazität		
U_S [V]	l_0 [mm]	n [cm ⁻¹]	U_S [V]	l_0 [mm]	n [cm ⁻¹]	U_S [V]	l_0 [mm]	n [cm ⁻¹]
19,25	1,40	21,4	19,25	1,50	29,7	19,25	1,75	26,3
20,80	2,55	20,4	20,25	2,30	21,1	20,25	2,65	14,0
22,10	3,30	10,6	21,25	3,20	11,3	21,25	3,35	7,2
25,00	4,40	3,5	22,20	3,65	8,8	22,20	3,85	6,2
—	—	—	24,95	4,65	3,3	24,95	4,95	1,5

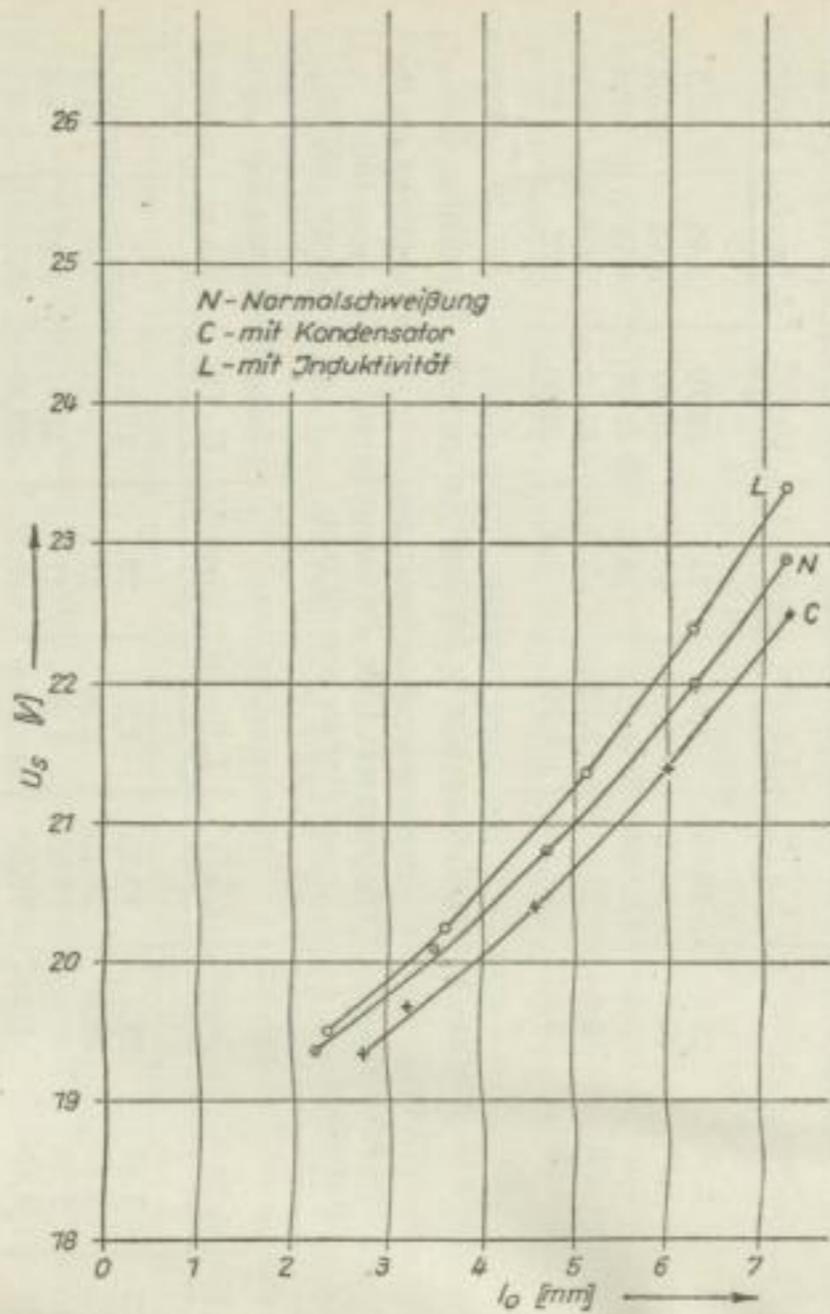


Bild 35. Schweißspannung U_s in Abhängigkeit von der Bogenlänge l_0 ;
Schweißstromstärke 140 A, Elektrode Ti VII m, 4 mm \varnothing

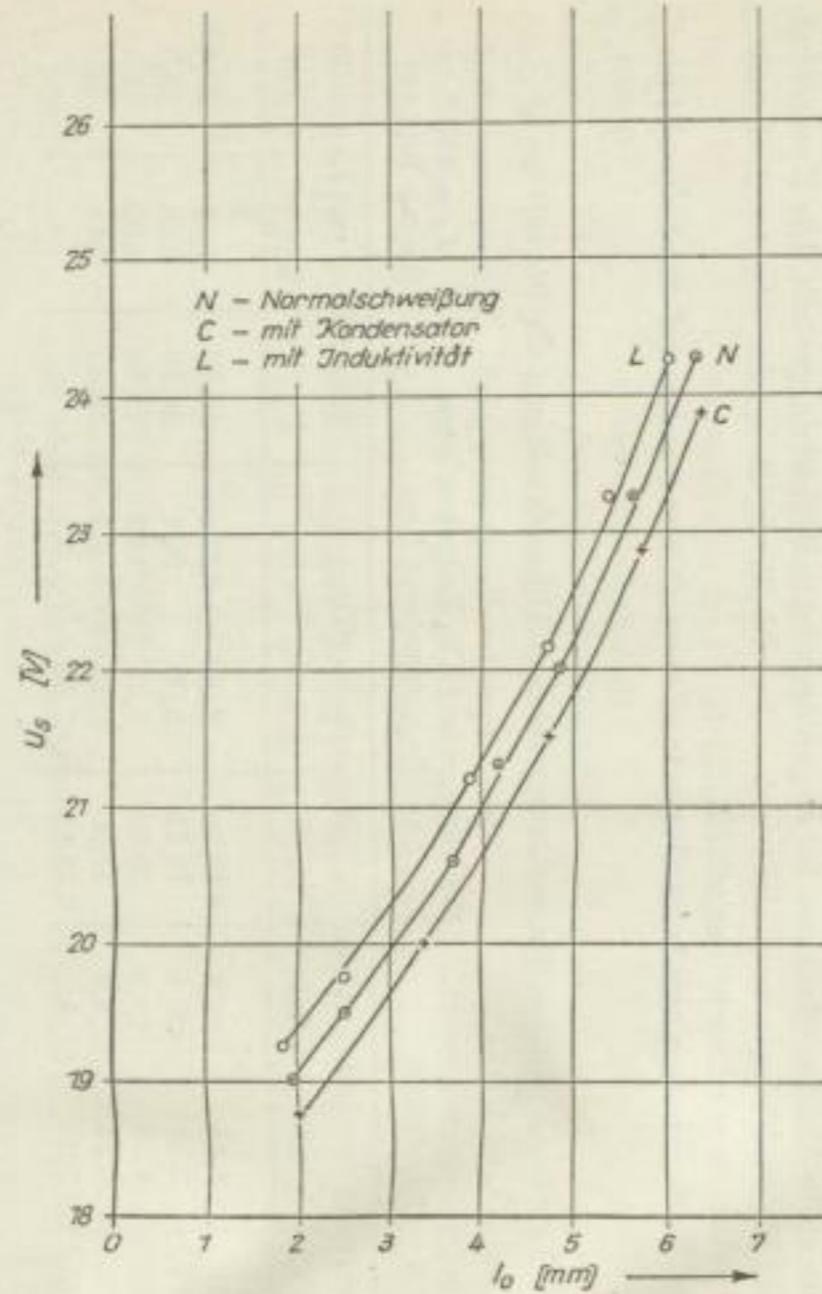


Bild 36. Schweißspannung U_s in Abhängigkeit von der Bogenlänge l_0 ;
Schweißstromstärke 160 A, Elektrode Ti VII m, 4 mm \varnothing

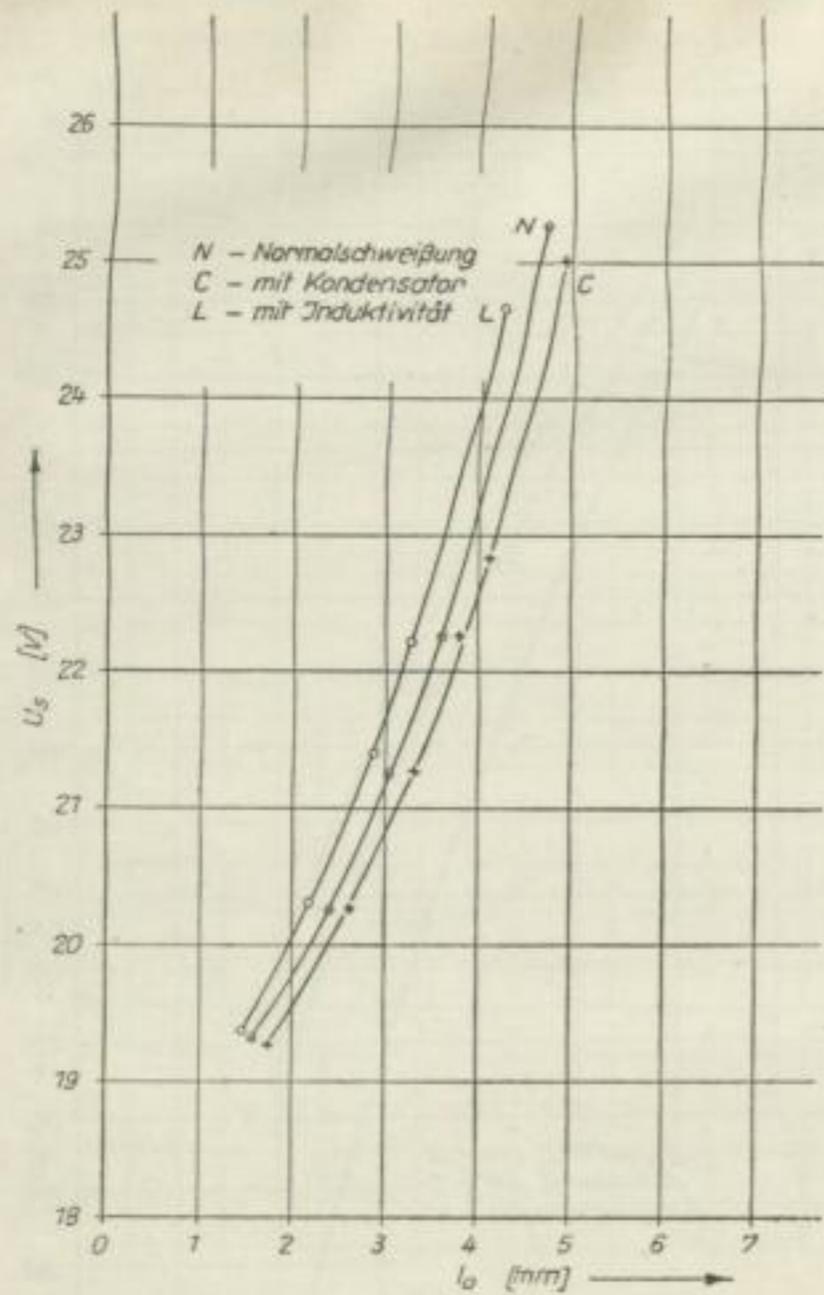


Bild 37. Schweißspannung U_s in Abhängigkeit von der Bogenlänge l_0 ;
Schweißstromstärke 190 A, Elektrode Ti VII m, 4 mm \varnothing

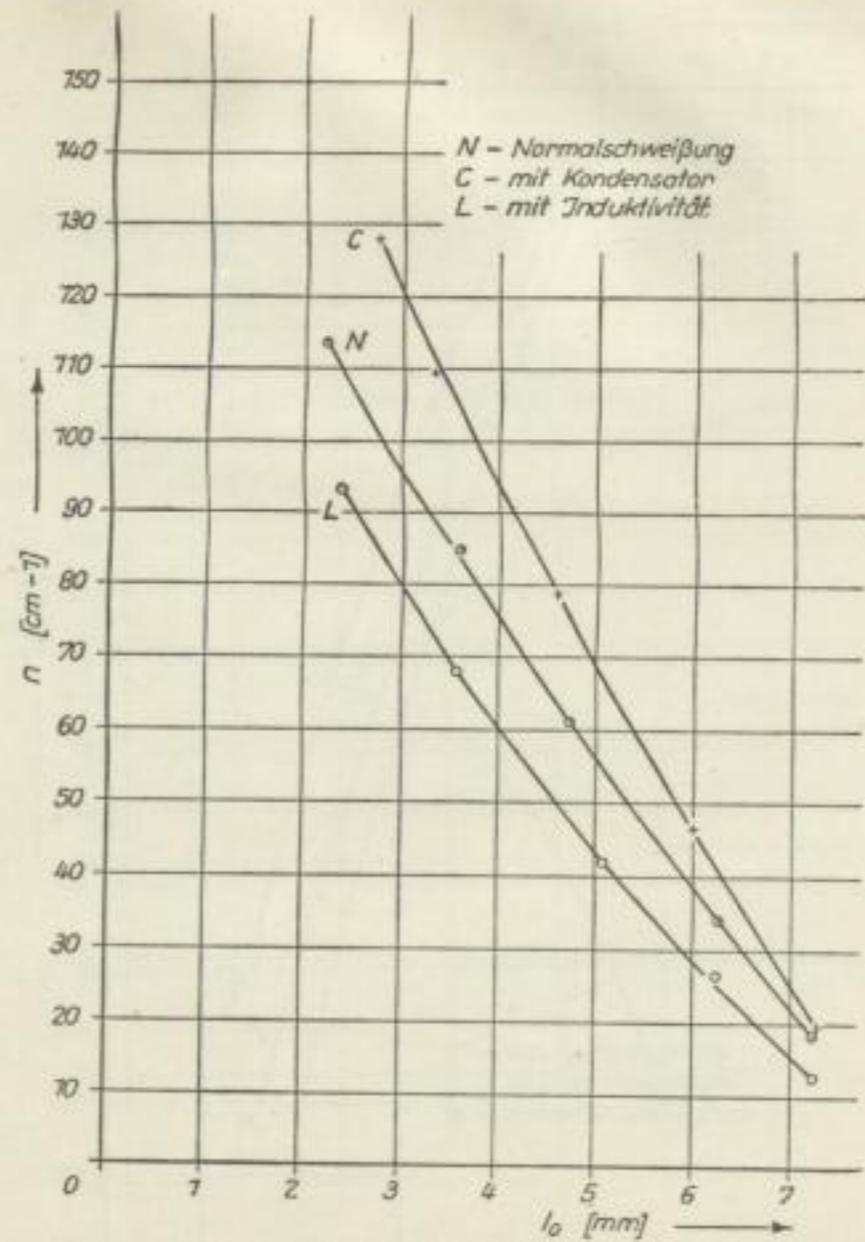


Bild 38. Kurzschlußanzahl n in Abhängigkeit von der Bogenlänge l_0 ;
Schweißstromstärke 140 A, Elektrode Ti VII m, 4 mm \varnothing

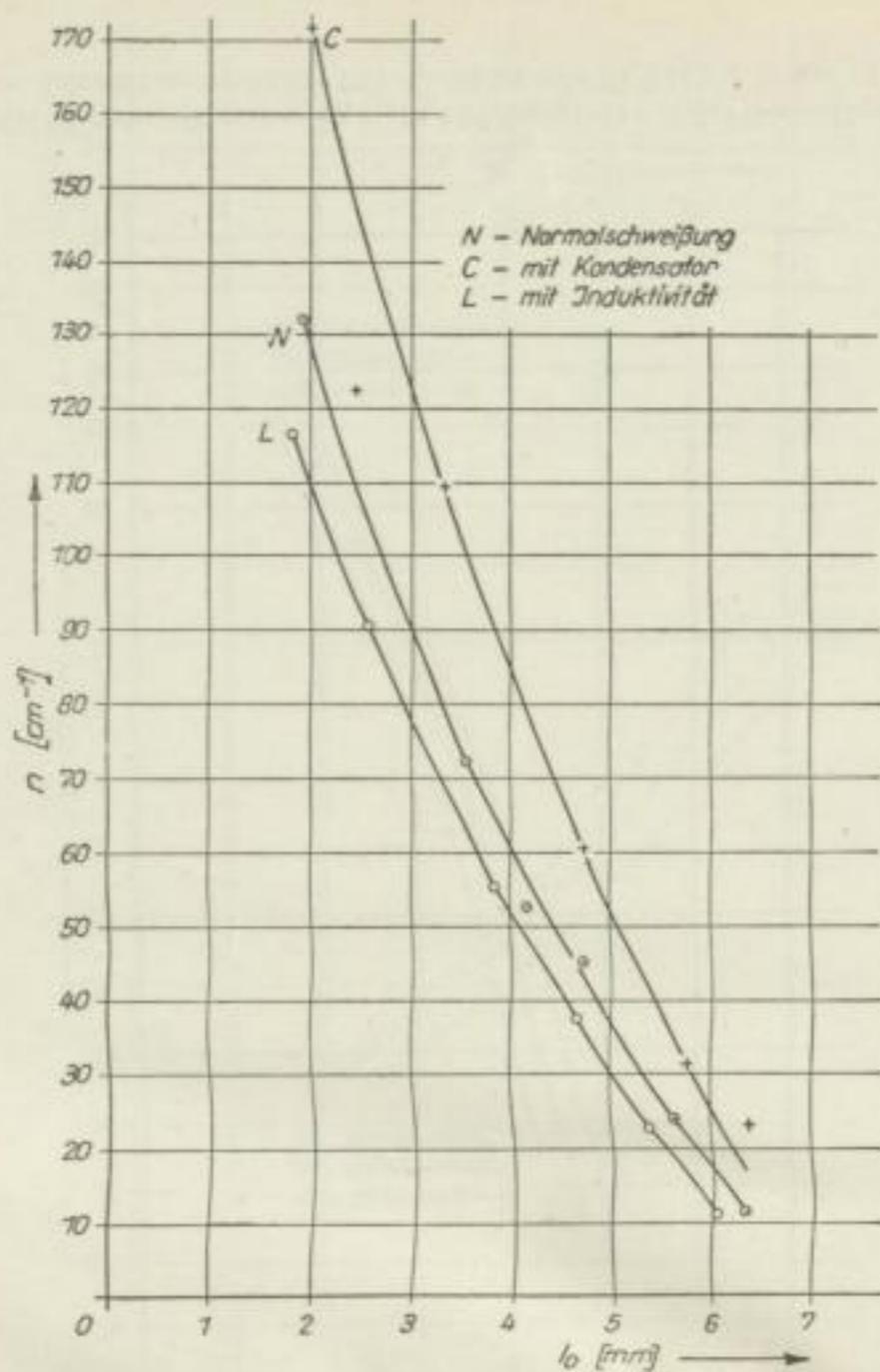


Bild 39. Kurzschlußanzahl n in Abhängigkeit von der Bogenlänge l_0 ;
Schweißstromstärke 160 A, Elektrode Ti VII m, 4 mm \varnothing .

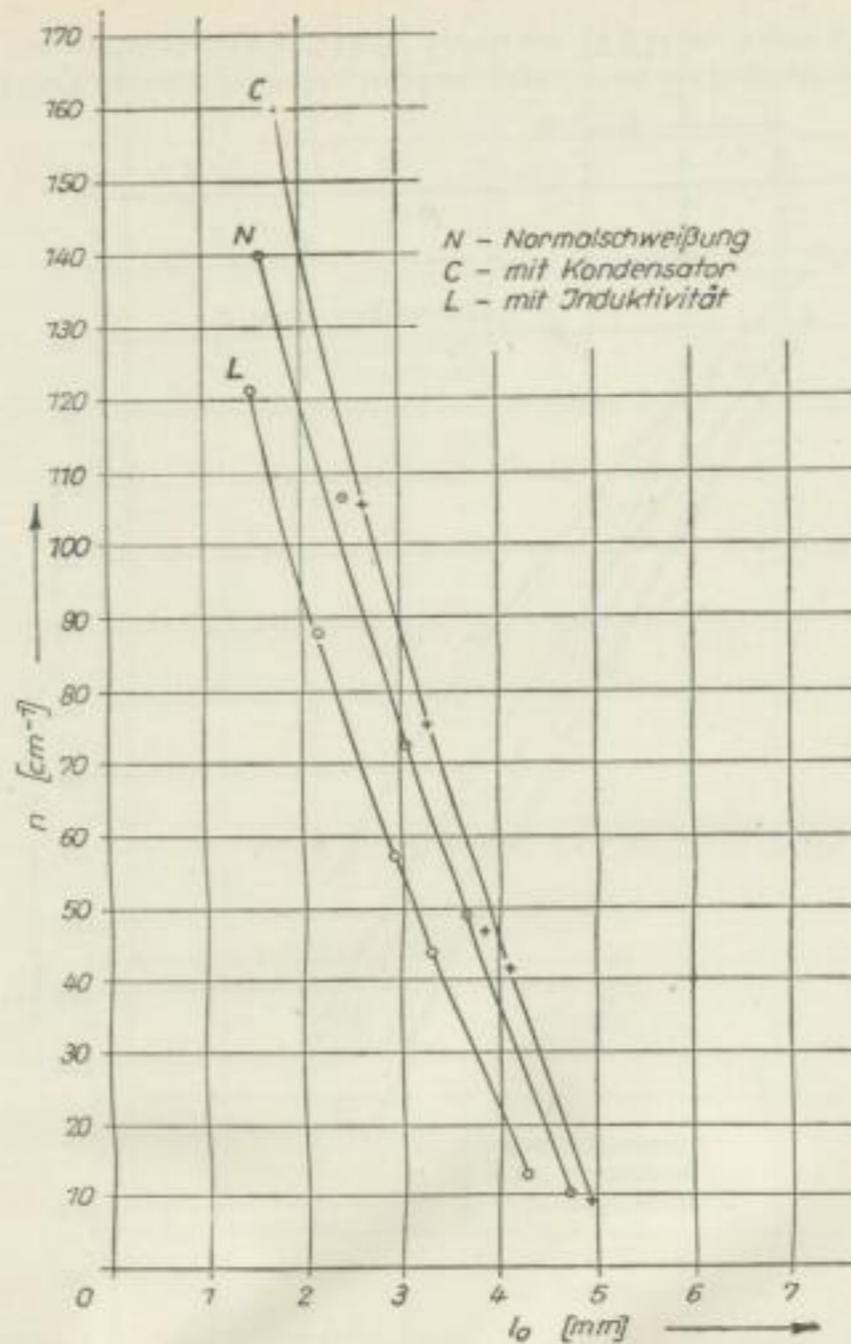


Bild 40. Kurzschlußanzahl n in Abhängigkeit von der Bogenlänge l_0 ;
Schweißstromstärke 190 A, Elektrode Ti VII m, 4 mm \varnothing .

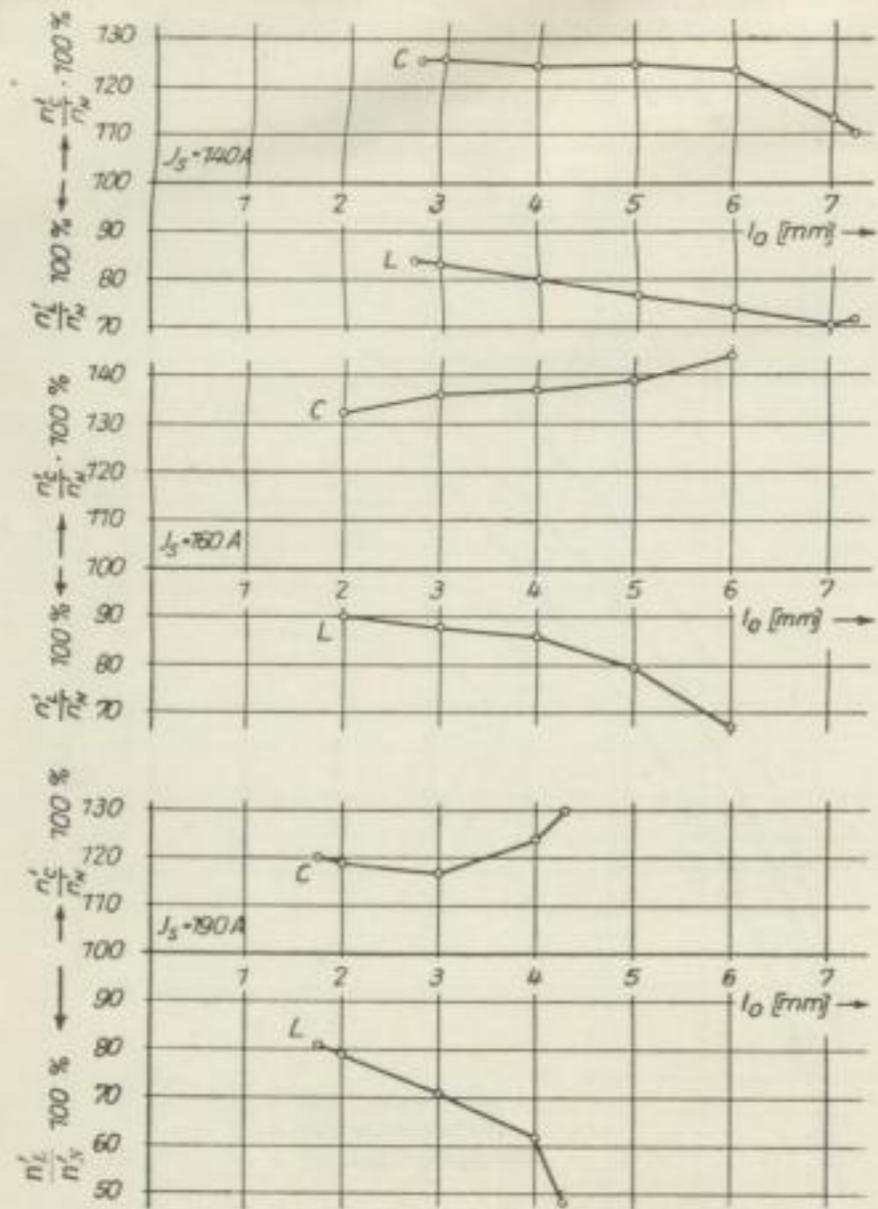


Bild 41. Prozentuales Verhältnis der Kurzschlußanzahlen in Abhängigkeit von der Bogenlänge l_0 (Normalschweißung = 100%)

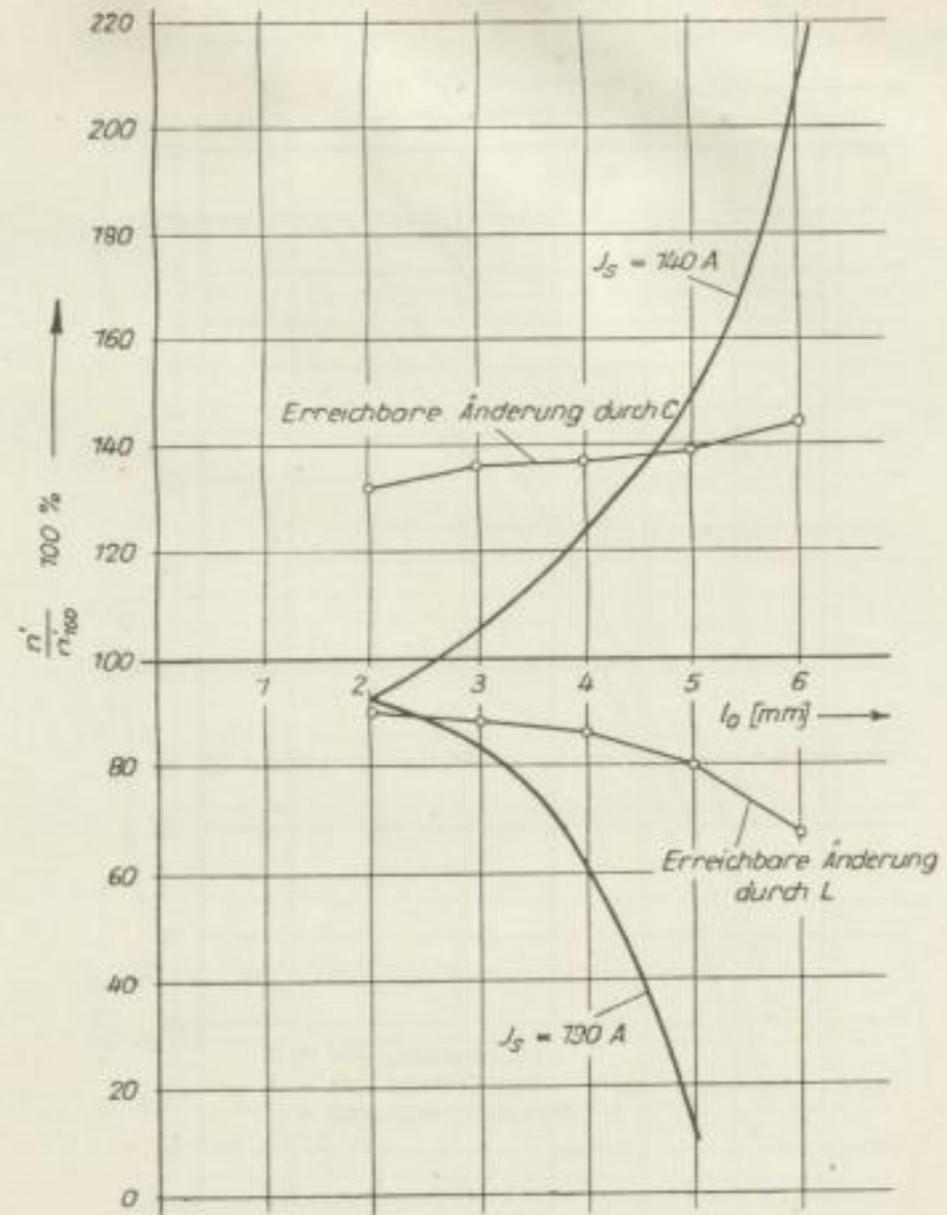


Bild 42. Prozentuales Verhältnis der Kurzschlußanzahlen in Abhängigkeit von der Bogenlänge l_0 bei Normalschweißung (Schweißung mit 160 A = 100%)

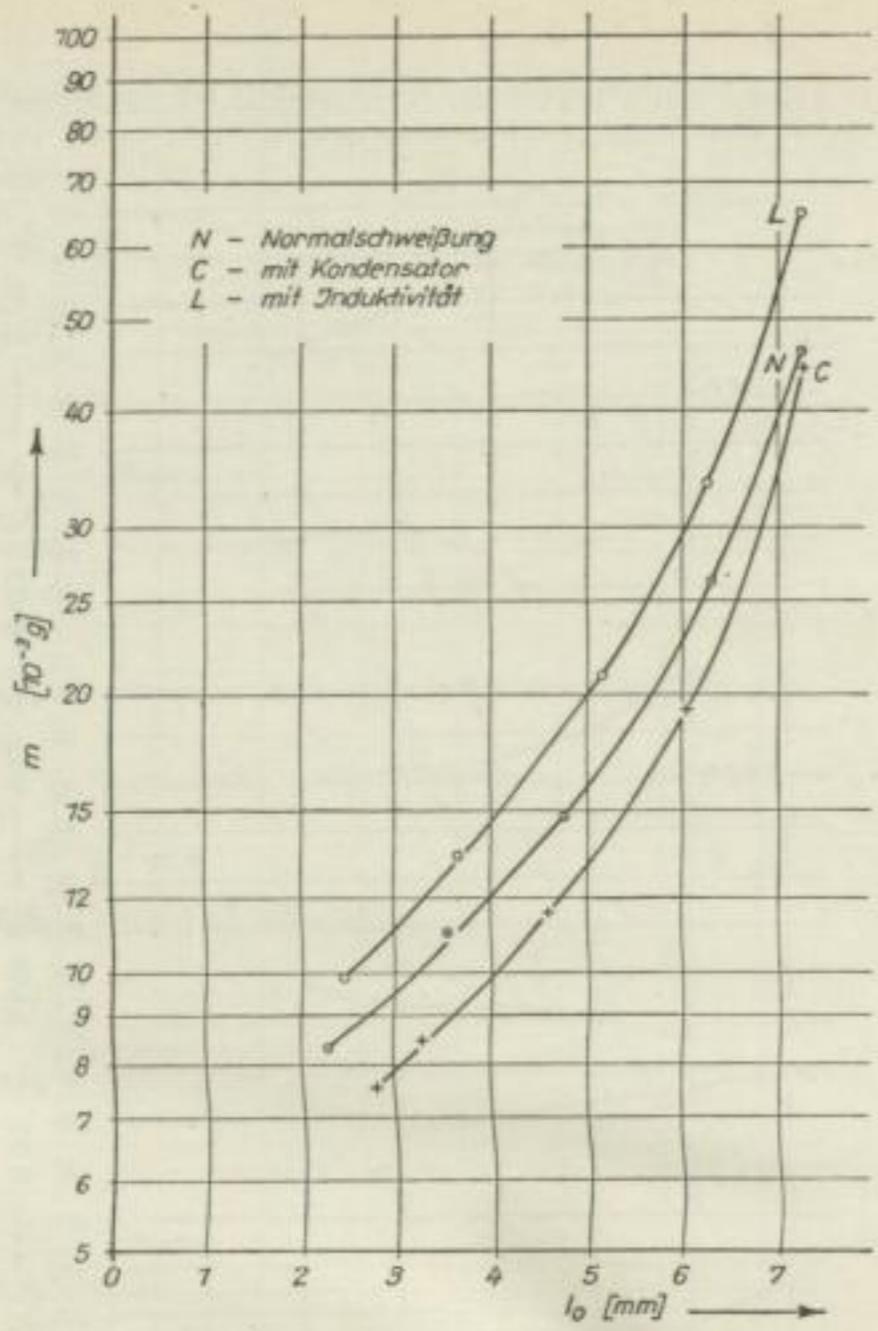


Bild 43. Mittleres Tropfengewicht m in Abhängigkeit von der Bogenlänge l_0 ; Schweißstromstärke 140 A, Elektrode Ti VII m, 4 mm Ø

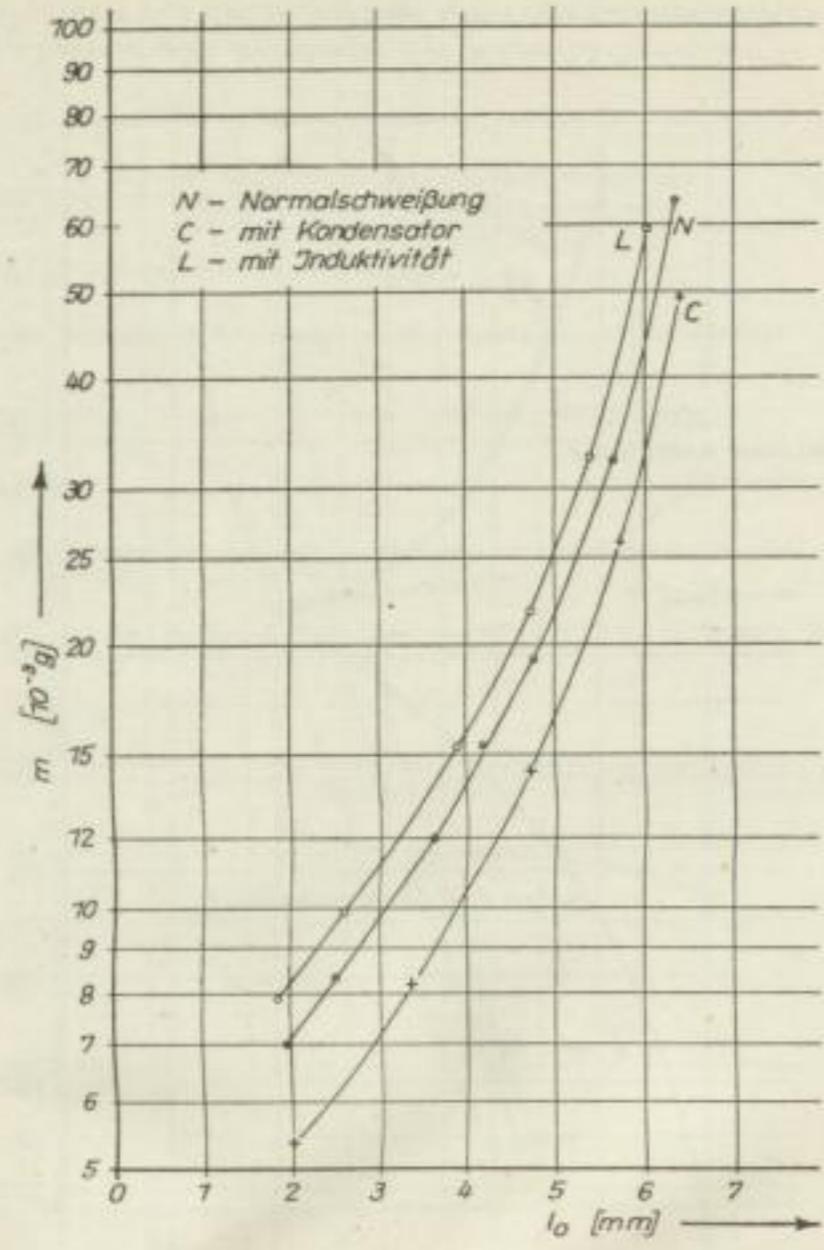


Bild 44. Mittleres Tropfengewicht m in Abhängigkeit von der Bogenlänge l_0 ; Schweißstromstärke 160 A, Elektrode Ti VII m, 4 mm Ø

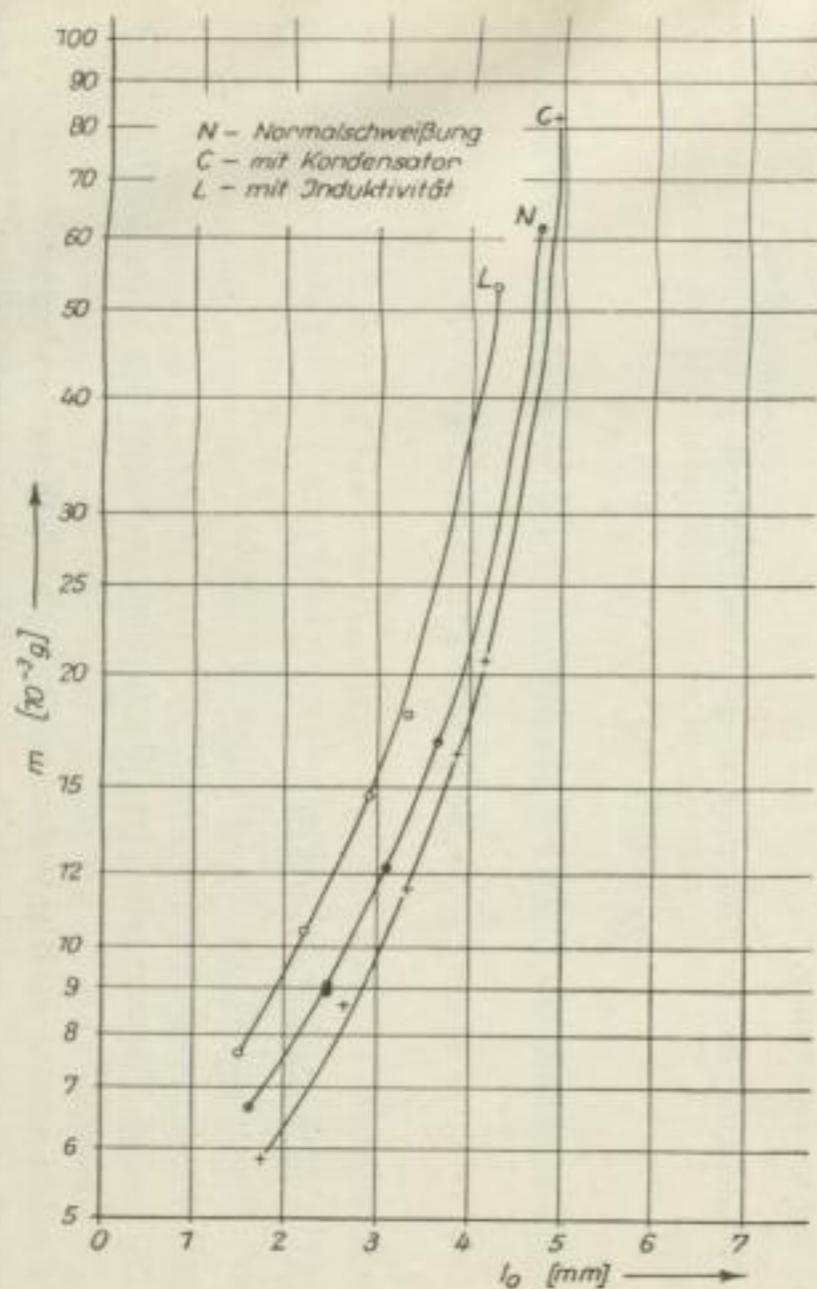


Bild 45. Mittleres Tropengewicht m in Abhängigkeit von der Bogenlänge l_0 ; Schweißstromstärke 190 A, Elektrode Ti VII m, 4 mm \varnothing

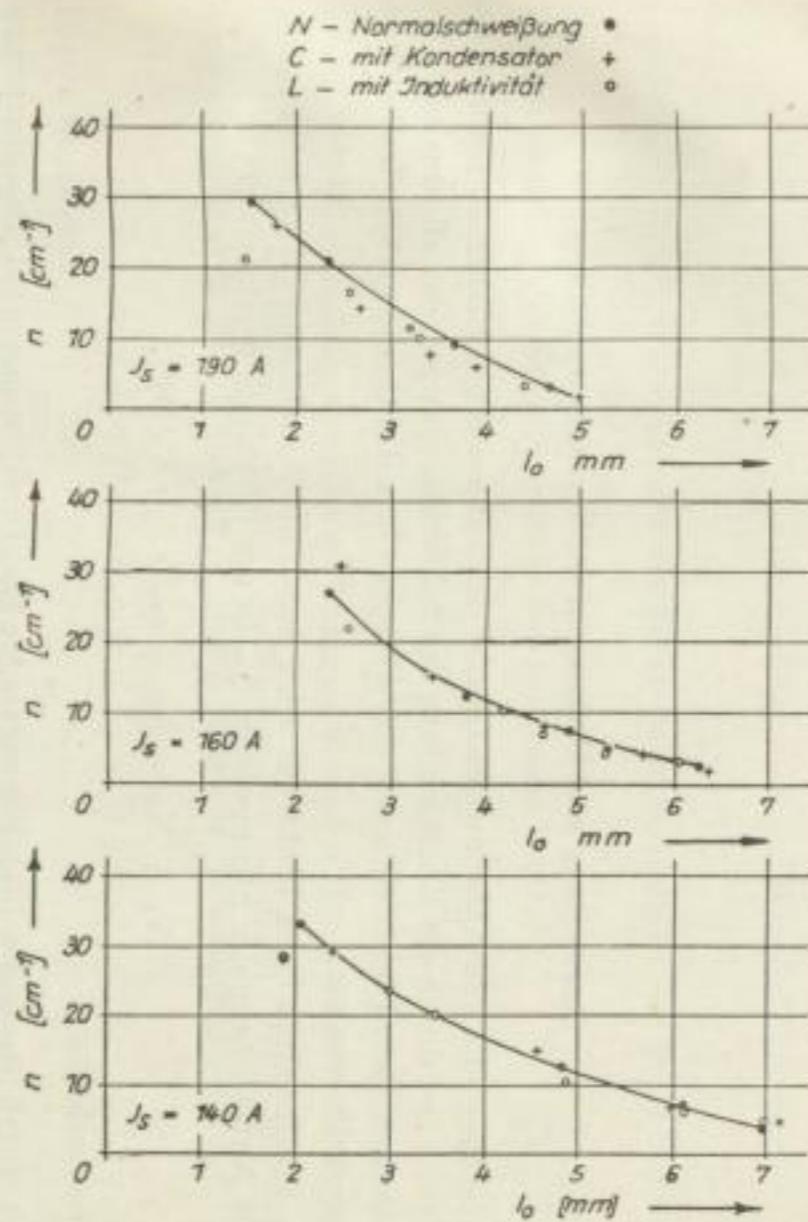


Bild 46. Kurzschlußzahl n in Abhängigkeit von der Bogenlänge l_0 ; Kurzschlußdauer ≥ 3 ms, Elektrode Ti VII m, 4 mm \varnothing

Versuchsergebnisse

Auswertung und Diskussion der Versuchsergebnisse

Die Größen, die den Abschmelzcharakter der untersuchten Elektrode kennzeichnen, sollen zunächst durch die Energiebilanz des Schmelzvorganges, der allgemeingültig das Abschmelzen einer Elektrode sowie das Aufschmelzen des Grundwerkstoffes beschreibt, herausgestellt werden.

Das Abschmelzen einer Elektrode wird durch die Nutzleistung des Lichtbogens N_E und die Nutzleistung der Stromwärme N_W in der Elektrode bestimmt [2].

$$N_E + N_W = (\eta_E + \eta_W) \cdot J_S \cdot U_S \text{ [W]}. \quad [1]$$

Hierin bedeutet:

η_E [%] Nutzleistung des Lichtbogens in der Elektrode, bezogen auf die aufgenommene Leistung N_{ges} ;

η_W [%] Nutzleistung der Stromwärme in der Elektrode, bezogen auf die aufgenommene Leistung N_{ges} ;

J_S [A] Schweißstromstärke,

U_S [V] Schweißspannung.

Die Nutzleistung des Lichtbogens erzeugt in der Elektrode je Zeiteinheit eine Wärmemenge q_E

$$q_E = 0,24 \cdot \eta_E \cdot J_S \cdot U_S \text{ [cal/s]},$$

die den Wärmehalt der Elektrode um den Betrag ΔS bis zum Abschmelzen erhöht.

$$q_E = w \cdot F_E \cdot \gamma \cdot \Delta S = w \cdot F_E \cdot \gamma (S_K - S_W) \text{ [cal/s]}.$$

Hierin bedeutet:

w [cm/s] Abschmelzgeschwindigkeit;

F_E [cm²] Querschnittsfläche des Elektrodenkerndrahtes;

γ [g/cm³] spezifisches Gewicht des Elektrodenkerndrahtes;

S_W u. S_K [cal/g] Wärmehalte des Elektrodenkerndrahtes bei den Temperaturen T_W und T_K ;

T_W [°C] Temperatur im Elektrodenkerndraht durch Widerstandserwärmung;

T_K [°C] Temperatur des abschmelzenden Elektrodenmaterials ($T_K = 2300^\circ \text{C}$ nach RYKALIN).

Die Nutzleistung des Lichtbogens in der Elektrode ergibt sich dann gemäß

$$N_E = \frac{1}{0,24} \cdot w \cdot F_E (S'_K - S'_W) \text{ [W]}, \quad (2)$$

wobei

S'_K und S'_W [cal/cm³] Wärmehalte des Elektrodenkerndrahtes bei den Temperaturen T_K und T_W .

Die Nutzleistung der Stromwärme in der Elektrode beträgt

$$N_W = \frac{1}{0,24} \cdot w \cdot F_E (S'_W - S'_{20}) \text{ [W]}, \quad (3)$$

wobei

S'_{20} [cal/cm³] Wärmehalt des Elektrodenkerndrahtes bei Raumtemperatur $T_0 = 20^\circ\text{C}$.

Die durch Widerstandserwärmung im Elektrodenkerndraht entwickelte Temperatur T_W ergibt sich nach RYKALIN [2] durch folgende Näherungsgleichung:

$$T_W = (D + T_0) \cdot e^{t \cdot \frac{A \cdot j^2}{D}} - D \text{ [}^\circ\text{C]}. \quad (4)$$

Hierin bedeuten:

D und A experimentell ermittelte Konstanten. Ihre Werte betragen nach RYKALIN für eine dünn umhüllte Elektrode mit niedriggeköhltem Kerndraht:

$$D = 200^\circ\text{C}$$

$$A = 2,4 \cdot 10^{-2} \frac{\text{mm}^4 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{A}^2 \cdot \text{s}}.$$

j [A/mm²] Stromdichte,

t [s] Abschmelzzeit.

Nach Einsetzen der bekannten Konstanten in (4) ergibt sich

$$T_W = 200 (1,1 \cdot e^{1,2 \cdot 10^{-4} \cdot t \cdot j^2} - 1) \text{ [}^\circ\text{C]}. \quad (5)$$

Die zum Abschmelzen der Elektrode aufgewendete Leistung setzt sich zusammen aus

$$N_W + N_E = \frac{1}{0,24} \cdot w \cdot F_E (S'_K - S'_{20}) \text{ [W]}. \quad (6)$$

Für die Berechnung des Abschmelzvorganges wird eine Elektrodeneinspannlänge von 260 mm zugrunde gelegt. Damit wird die Temperatur des Elektrodenkerndrahtes ermittelt, die sich einstellt, wenn 90 mm Elektrodenlänge, d. h. die Hälfte des für den Registriervorgang ausgewählten Elektrodenabschnittes, verschweißt sind.

Der Wärmehalt ist nach RYKALIN für einen Stahl mit 0,1% C in einem Temperaturintervall zwischen 0 und 1600° C bekannt (s. Bild 47). Für die Berechnung der Nutzleistung des Lichtbogens N_E wird der Wärmehalt S'_K bei der Temperatur T_K durch Extrapolieren ermittelt, da oberhalb einer Temperatur von 1600° C keine Umwandlungspunkte im Stahl mehr vorliegen. Bild 47 gibt die Abhängigkeit der Funktion $S' = f(T)$ wieder ($S'_K = 3670$ cal/cm³ bei $T_K = 2300^\circ\text{C}$).

Nach Einsetzen bekannter Konstanten in (6) beträgt die für das Abschmelzen der untersuchten Elektrode erforderliche Leistung

$$N_W + N_E = 1910 \cdot w \text{ [W]}. \quad (7)$$

Die für das Aufschmelzen des Grundwerkstoffes benötigte Leistung ergibt sich gemäß

$$N_A = \frac{1}{0,24} \cdot v \cdot F_A (S'_A - S'_{20}) \text{ [W]}. \quad (8)$$

Hierin bedeutet:

- v [cm/s] Schweißgeschwindigkeit;
 F_A [cm²] Querschnittsfläche des aufgeschmolzenen Grundwerkstoffes;
 S'_A [cal/cm³] Wärmeinhalt des Grundwerkstoffes bei Schmelztemperatur $T_A = 1530^\circ \text{C}$
 (der Wärmeinhalt ist für niedriggekohten Stahl Bild 47 zu entnehmen).

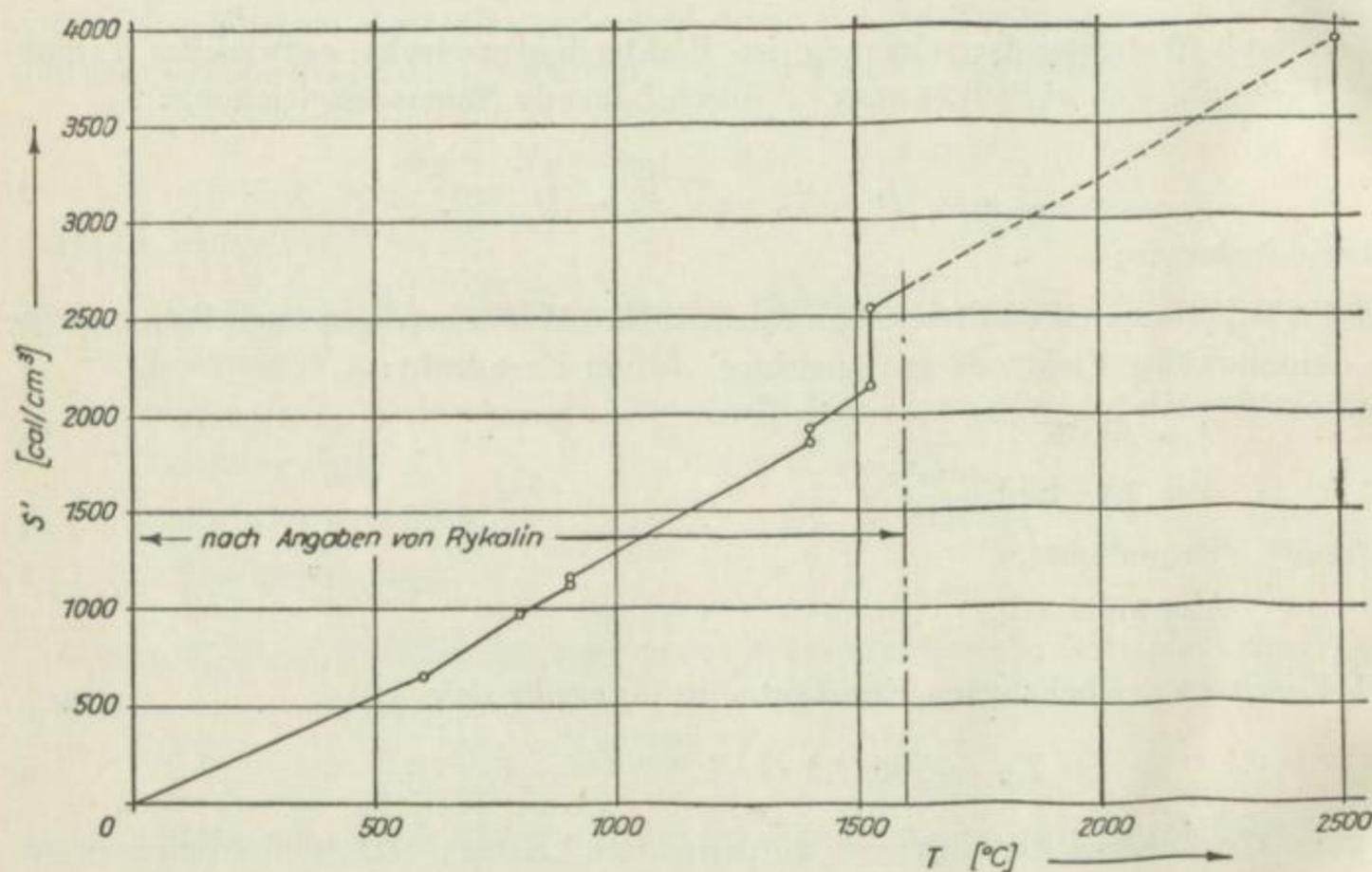


Bild 47. Wärmeinhalt S' in Abhängigkeit von der Temperatur T

Setzt man die bekannten Konstanten in (8) ein, so erhält man

$$N_A = 3540 \cdot F_A \text{ [W]}. \quad (9)$$

Die Werte der Energiebilanz sind in den Tabellen 17 bis 25 zusammengestellt. Eine Erläuterung zu diesen Tabellen wird im Anschluß an Tabelle 25 gegeben.

Bezieht man die für das Abschmelzen der Elektrode und das Aufschmelzen des Grundwerkstoffes ermittelten Leistungen N_W , N_E und N_A auf die aufgenommene Gesamtleistung $N_{\text{ges}} = U_S \cdot J_S$, so erhält man die in den Bildern 48 bis 50 dargestellten Funktionen, die den Wirkungsgrad η_W , η_E und η_A in Abhängigkeit von der Bogenlänge beschreiben und eine Aufteilung der für den Schmelzvorgang aufgenommenen Leistung zeigen.

Tabelle 17: Werte zur Aufstellung der Energiebilanz des Schmelzvorganges

Elektrode Ti VII m, 4 mm \varnothing Schweißstromstärke $J_S = 140$ A
 Schweißgeschwindigkeit $v = 20$ cm/min Schweißung mit Induktivität

(hierzu s. Erläuterung S. 67 und Bilder 49 und 51)

l_0 [mm]	U_S [V]	N_{ges} [W]	w [cm/s]	T_W [°C]	N_E [W]	η_E [%]	N_W [W]
2,50	19,60	2744	0,397	109	739	26,9	18
3,75	20,35	2849	0,373	115	693	24,3	18
5,00	21,25	2975	0,352	122	652	21,9	19
6,25	22,40	3136	0,335	128	619	19,7	20
7,50	23,70	3318	0,321	134	592	17,8	20

η_W [%]	$N_E + N_W$ [W]	$\eta_E + \eta_W$ [%]	F_A [cm ²]	N_A [W]	η_A [%]	N_N [W]	η_N [%]
0,66	757	27,6	—	—	—	—	—
0,63	711	25,0	—	—	—	—	—
0,64	671	22,6	—	—	—	—	—
0,64	639	20,4	—	—	—	—	—
0,60	612	18,4	—	—	—	—	—

Tabelle 18. Werte zur Aufstellung der Energiebilanz des Schmelzvorganges

Elektrode Ti VII m, 4 mm \varnothing Schweißstromstärke $J_S = 140$ A
 Schweißgeschwindigkeit $v = 20$ cm/min Normalschweißung

(hierzu s. Erläuterung S. 67 und Bilder 48 bis 51)

l_0 [mm]	U_S [V]	N_{ges} [W]	w [cm/s]	T_W [°C]	N_E [W]	η_E [%]	N_W [W]
2,50	19,50	2730	0,383	112	711	26,0	19
3,75	20,20	2828	0,358	120	664	23,4	19
5,00	21,00	2940	0,339	127	626	21,3	20
6,25	22,00	3080	0,325	132	600	19,5	20
7,50	23,15	3241	0,316	136	583	18,0	20

η_W [%]	$N_E + N_W$ [W]	$\eta_E + \eta_W$ [%]	F_A [cm ²]	N_A [W]	η_A [%]	N_N [W]	η_N [%]
0,70	730	26,7	0,053	188	6,9	918	33,6
0,67	683	24,1	0,073	258	9,1	941	33,2
0,68	646	22,0	0,104	368	12,5	1014	34,5
0,65	620	20,1	0,097	343	11,1	963	31,2
0,62	603	18,6	0,057	202	6,2	805	24,8

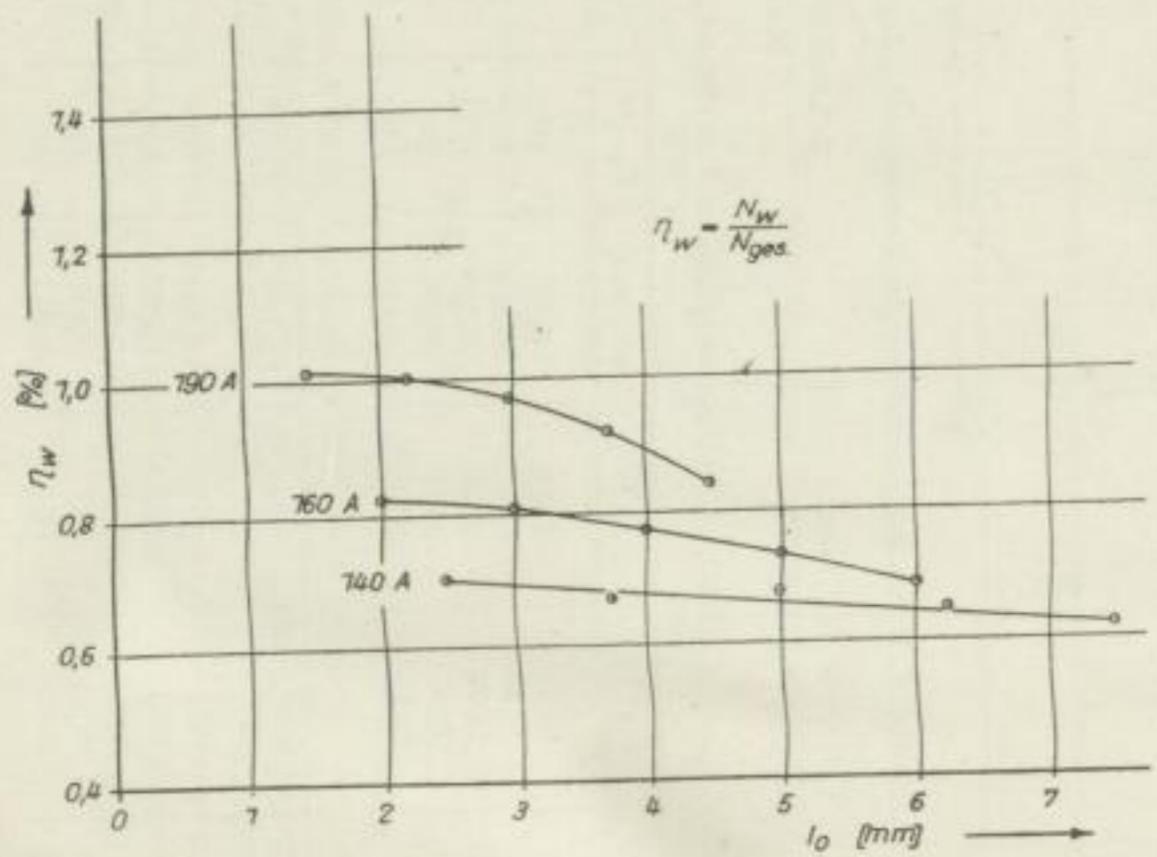


Bild 48. Wirkungsgrad η_W in Abhängigkeit von der Bogenlänge l_0

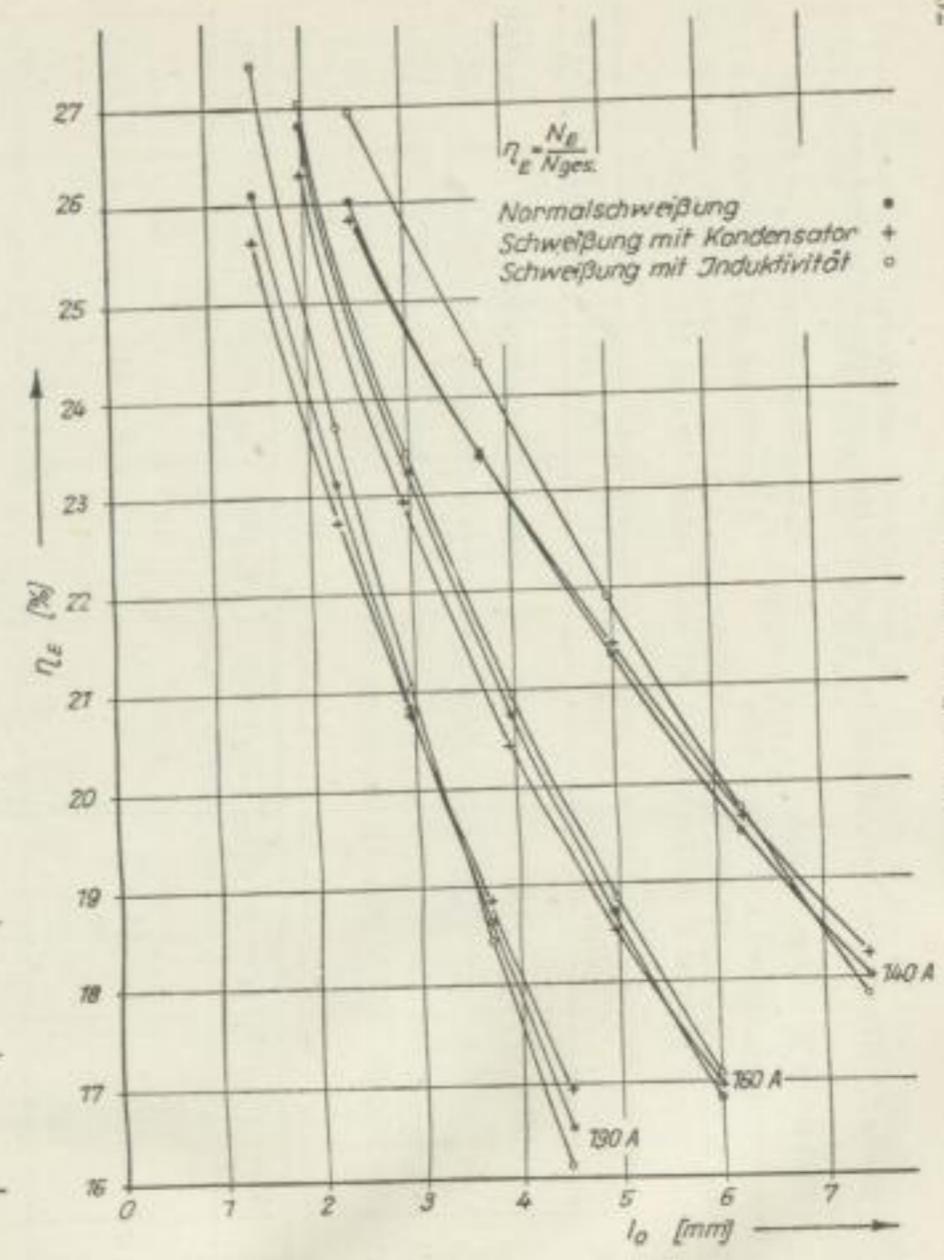


Bild 49. Wirkungsgrad η_E in Abhängigkeit von der Bogenlänge l_0

Versuchsergebnisse

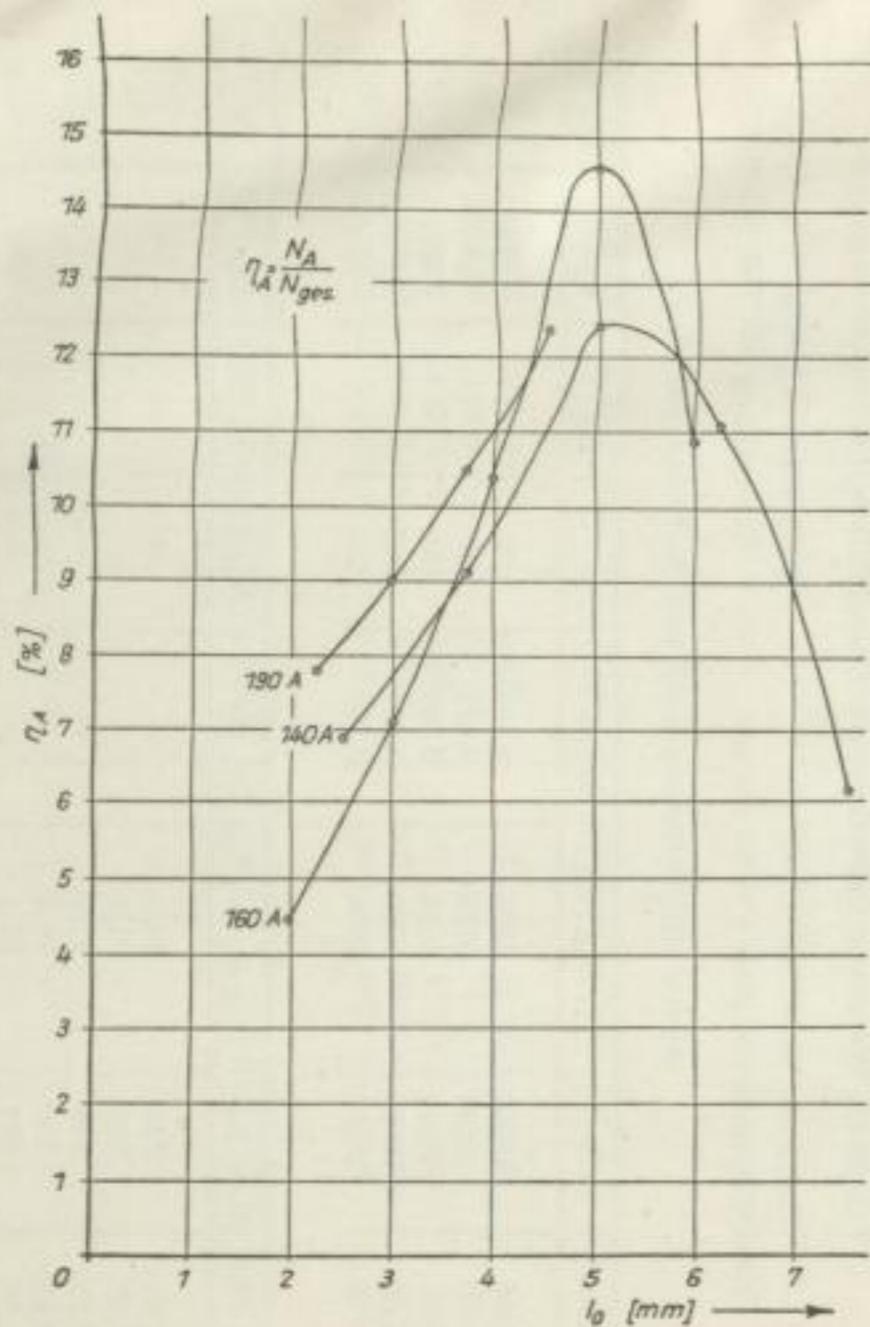


Bild 50. Wirkungsgrad η_A in Abhängigkeit von der Bogenlänge l_0

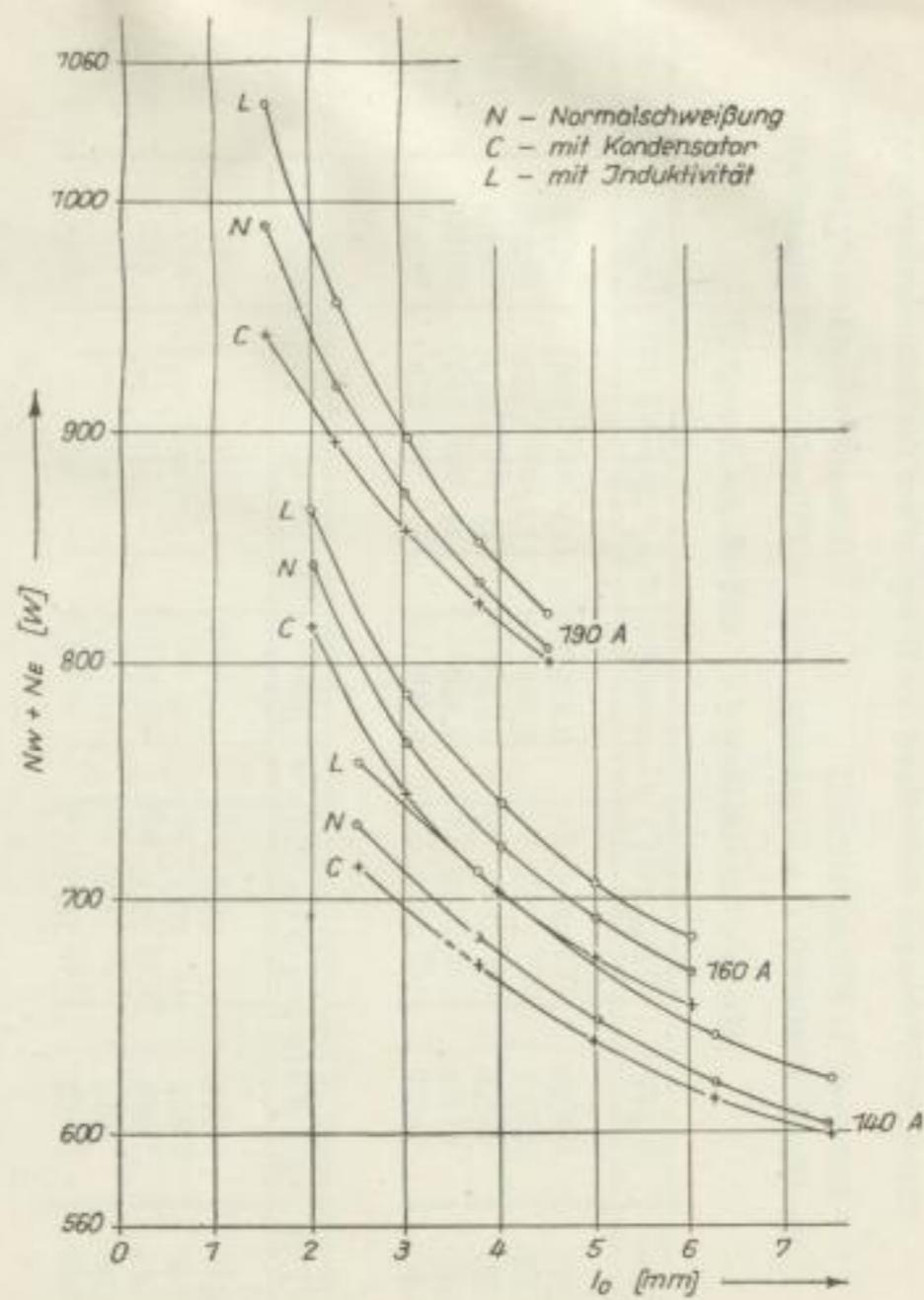


Bild 51. Nutzleistung $N_W + N_E$ in Abhängigkeit von der Bogenlänge l_0

Tabelle 19. Werte zur Aufstellung der Energiebilanz des Schmelzvorganges

Elektrode Ti VII m, 4 mm \varnothing Schweißstromstärke $J_S = 140$ A
 Schweißgeschwindigkeit $v = 20$ cm/min Schweißung mit Kondensator

(hierzu s. Erläuterung S. 67 und Bilder 49 und 51)

l_0 [mm]	U_S [V]	N_{ges} [W]	w [cm/s]	T_W [°C]	N_E [W]	η_E [%]	N_W [W]
2,50	19,20	2688	0,374	115	694	25,8	19
3,75	19,90	2786	0,352	122	652	23,4	19
5,00	20,65	2891	0,335	128	619	21,4	20
6,25	21,60	3024	0,322	134	594	19,6	20
7,50	22,70	3178	0,314	137	579	18,2	20

η_W [%]	$N_E + N_W$ [W]	$\eta_E + \eta_W$ [%]	F_A [cm ²]	N_A [W]	η_A [%]	N_N [W]	η_N [%]
0,71	713	26,5	—	—	—	—	—
0,68	671	24,1	—	—	—	—	—
0,69	639	22,1	—	—	—	—	—
0,66	614	21,3	—	—	—	—	—
0,63	599	18,8	—	—	—	—	—

Tabelle 20. Werte zur Aufstellung der Energiebilanz des Schmelzvorganges

Elektrode Ti VII m, 4 mm \varnothing Schweißstromstärke $J_S = 160$ A
 Schweißgeschwindigkeit $v = 20$ cm/min Schweißung mit Induktivität

(hierzu s. Erläuterung S. 67 und Bilder 49 und 51)

l_0 [mm]	U_S [V]	N_{ges} [W]	w [cm/s]	T_W [°C]	N_E [W]	η_E [%]	N_W [W]
2,00	19,40	3104	0,454	124	840	27,0	25
3,00	20,30	3248	0,413	136	761	23,4	25
4,00	21,30	3408	0,388	146	714	20,9	25
5,00	22,55	3608	0,370	153	680	18,8	25
6,00	24,15	3864	0,358	158	657	17,0	25

η_W [%]	$N_E + N_W$ [W]	$\eta_E + \eta_W$ [%]	F_A [cm ²]	N_A [W]	η_A [%]	N_N [W]	η_N [%]
0,81	865	27,8	—	—	—	—	—
0,77	786	24,2	—	—	—	—	—
0,73	739	21,6	—	—	—	—	—
0,69	705	19,5	—	—	—	—	—
0,65	682	17,6	—	—	—	—	—

Tabelle 21. Werte zur Aufstellung der Energiebilanz des Schmelzvorganges

Elektrode Ti VII m, 4 mm \varnothing Schweißstromstärke $J_S = 160$ A
 Schweißgeschwindigkeit $v = 20$ cm/min Normalschweißung

(hierzu s. Erläuterung S. 67 und Bilder 48 bis 51)

l_0 [mm]	U_S [V]	N_{ges} [W]	w [cm/s]	T_W [°C]	N_E [W]	η_E [W]	N_W [W]
2,00	19,05	3048	0,443	127	817	26,8	25
3,00	19,95	3192	0,401	140	740	23,2	26
4,00	21,00	3360	0,378	150	695	20,7	26
5,00	22,20	3552	0,362	157	665	18,7	26
6,00	23,70	3806	0,350	163	641	16,8	26

η_W [%]	$N_E + N_W$ [W]	$\eta_E + \eta_W$ [%]	F_A [cm ²]	N_A [W]	η_A [%]	N_N [W]	η_N [%]
0,82	842	27,6	0,039	138	4,5	980	32,1
0,81	766	24,0	0,064	226	7,1	992	31,1
0,77	721	21,5	0,099	350	10,4	1071	31,9
0,73	691	19,5	0,147	520	14,6	1211	34,1
0,68	667	17,5	0,117	414	10,9	1081	28,4

Tabelle 22. Werte zur Aufstellung der Energiebilanz des Schmelzvorganges

Elektrode Ti VII m, 4 mm \varnothing Schweißstromstärke $J_S = 160$ A
 Schweißgeschwindigkeit $v = 20$ cm/min Schweißung mit Kondensator

(hierzu s. Erläuterung S. 67 und Bilder 49 und 51)

l_0 [mm]	U_S [V]	N_{ges} [W]	w [cm/s]	T_W [°C]	N_E [W]	η_E [%]	N_W [W]
2,00	18,75	3000	0,427	132	789	26,3	26
3,00	19,60	3136	0,390	145	717	22,9	26
4,00	20,65	3304	0,368	154	676	20,4	26
5,00	21,80	3488	0,353	162	645	18,5	27
6,00	23,20	3712	0,343	166	627	16,9	27

η_W [%]	$N_E + N_W$ [W]	$\eta_E + \eta_W$ [%]	F_A [cm ²]	N_A [W]	η_A [%]	N_N [W]	η_N [%]
0,87	815	27,2	—	—	—	—	—
0,83	743	23,7	—	—	—	—	—
0,79	702	21,2	—	—	—	—	—
0,77	672	19,3	—	—	—	—	—
0,72	654	17,6	—	—	—	—	—

Tabelle 23. Werte zur Aufstellung der Energiebilanz des Schmelzvorganges

Elektrode Ti VII m, 4 mm \varnothing
Schweißgeschwindigkeit $v = 20$ cm/min

Schweißstromstärke $J_S = 190$ A
Schweißung mit Induktivität

(hierzu s. Erläuterung S. 67 und Bilder 49 und 51)

l_0 [mm]	U_S [V]	N_{ges} [W]	w [cm/s]	T_W [°C]	N_E [W]	η_E [%]	N_W [W]
1,50	19,35	3676	0,546	146	1004	27,4	37
2,25	20,35	3866	0,501	160	917	23,7	38
3,00	21,55	4094	0,470	173	858	21,0	38
3,75	23,20	4408	0,446	183	812	18,4	38
4,50	25,40	4826	0,429	192	778	16,1	39

η_W [%]	$N_E + N_W$ [W]	$\eta_E + \eta_W$ [%]	F_A [cm ²]	N_A [W]	η_A [%]	N_N [W]	η_N [%]
1,01	1041	28,4	—	—	—	—	—
0,98	955	24,7	—	—	—	—	—
0,93	896	21,9	—	—	—	—	—
0,86	850	19,3	—	—	—	—	—
0,81	817	16,9	—	—	—	—	—

Tabelle 24. Werte zur Aufstellung der Energiebilanz des Schmelzvorganges

Elektrode Ti VII m, 4 mm \varnothing
Schweißgeschwindigkeit $v = 20$ cm/min

Schweißstromstärke $J_S = 190$ A
Normalschweißung

(hierzu s. Erläuterung S. 67 und Bilder 48 bis 51)

l_0 [mm]	U_S [V]	N_{ges} [W]	w [cm/s]	T_W [°C]	N_E [W]	η_E [%]	N_W [W]
1,50	19,20	3648	0,518	155	951	26,1	37
2,25	20,05	3809	0,483	167	881	23,1	38
3,00	21,10	4009	0,458	178	834	20,8	39
3,75	22,45	4265	0,438	187	795	18,6	39
4,50	24,45	4645	0,423	195	766	16,5	39

η_W [%]	$N_E + N_W$ [W]	$\eta_E + \eta_W$ [%]	F_A [cm ²]	N_A [W]	η_A [%]	N_N [W]	η_N [%]
1,01	988	27,1	0,073	258	7,1	1246	34,2
1,00	919	24,1	0,084	298	7,8	1217	31,9
0,97	873	21,8	0,102	361	9,0	1234	30,8
0,91	834	19,5	0,127	450	10,5	1248	30,0
0,84	805	17,3	0,163	578	12,4	1383	29,7

Tabelle 25. Werte zur Aufstellung der Energiebilanz des Schmelzvorganges

Elektrode Ti VII m, 4 mm \varnothing Schweißstromstärke $J_S = 190$ A
 Schweißgeschwindigkeit $v = 20$ cm/min Schweißung mit Induktivität

(hierzu s. Erläuterung S. 67 und Bilder 49 und 51)

l_0 [mm]	U_S [V]	N_{ges} [W]	w [cm/s]	T_W [°C]	N_E [W]	η_E [%]	N_W [W]
1,50	19,05	3619	0,493	164	902	25,6	38
2,25	19,80	3762	0,469	173	855	22,7	39
3,00	20,75	3942	0,449	181	817	20,7	39
3,75	22,00	4180	0,432	189	785	18,8	39
4,50	23,70	4503	0,419	197	760	16,9	39

η_W [%]	$N_E + N_W$ [W]	$\eta_E + \eta_W$ [%]	F_A [cm ²]	N_A [W]	η_A [%]	N_N [W]	η_N [%]
1,08	940	26,7	—	—	—	—	—
1,04	894	23,8	—	—	—	—	—
0,99	856	21,7	—	—	—	—	—
0,93	824	19,7	—	—	—	—	—
0,86	799	17,7	—	—	—	—	—

Erläuterung zu den Tabellen 17 bis 25

l_0 [mm]	Bogenlänge
U_S [V]	Schweißspannung
N_{ges} [W]	für den Schmelzvorgang aufgenommene Leistung
w [cm/s]	Abschmelzgeschwindigkeit
T_W [°C]	Temperatur der Elektrode durch Stromwärme
N_E [W]	Nutzleistung des Lichtbogens in der Elektrode
η_E [%]	Nutzleistung des Lichtbogens in der Elektrode in Prozenten der aufgenommenen Leistung
N_W [W]	Nutzleistung der Stromwärme in der Elektrode
η_W [%]	Nutzleistung der Stromwärme in der Elektrode in Prozenten der aufgenommenen Leistung
$N_E + N_W$ [W]	zum Abschmelzen der Elektrode benötigte Leistung
$\eta_E + \eta_W$ [%]	zum Abschmelzen der Elektrode benötigte Leistung in Prozenten der aufgenommenen Leistung
F_A [cm ²]	Querschnittsfläche des aufgeschmolzenen Grundwerkstoffes
N_A [W]	zum Aufschmelzen des Werkstückes benötigte Leistung
η_A [%]	zum Aufschmelzen des Werkstückes benötigte Leistung in Prozenten der aufgenommenen Leistung
N_N [W]	gesamte Nutzleistung
η_N [%]	gesamte Nutzleistung in Prozenten der aufgenommenen Leistung

Die Funktion $\eta_W = f(l_0)$ fällt infolge der Verringerung der Abschmelzgeschwindigkeit mit zunehmender Bogenlänge nur schwach ab, und zwar um so mehr, je größer die Schweißstromstärke wird. Dies ist durch den Gradienten der Schweißspannung bedingt, der mit zunehmender Bogenlänge und Schweißstromstärke anwächst. In Bild 48 sind nur die Werte für die Normalschweißung eingetragen, da eine Veränderung des Abschmelzcharakters und die damit verknüpfte unterschiedliche Schweißspannung keinen wesentlichen Einfluß auf den Wirkungsgrad η_W ausübt. Ein Vergleich der Nutzleistungen N_W und N_E zeigt, daß die Stromwärme in der Elektrode keinen nennenswerten Anteil zum Abschmelzvorgang liefert.

Der Wirkungsgrad $\eta_E = f(l_0)$ (Bild 49) nimmt mit zunehmender Bogenlänge stark ab, da sich die Abschmelzgeschwindigkeit vermindert und damit, bedingt durch die Erhöhung der Stromwärme, ebenfalls der Wärmeinhalt, der durch die Nutzleistung des Lichtbogens N_E aufzubringen ist. Die Nutzleistung des Lichtbogens nimmt deshalb mit zunehmender Bogenlänge ab, während die aufgenommene Leistung entsprechend dem Gradienten der Schweißspannung ansteigt. Der elektrische Anschlußkreis gewinnt keinen beachtenswerten Einfluß auf den Wirkungsgrad η_E . Die bei größeren Bogenlängen auftretenden Überschneidungen der Funktionen bei Veränderung des elektrischen Anschlußkreises werden durch die abnehmende Abschmelzgeschwindigkeit mit zunehmender Bogenlänge und den entsprechenden Verlauf der Schweißspannung hervorgerufen.

Die Nutzleistung des Lichtbogens zum Aufschmelzen des Grundwerkstoffes N_A durchläuft für Schweißstromstärken, die dem Elektrodentyp und -durchmesser angepaßt sind, ein Maximum bei einer Bogenlänge, die auch empirisch als die günstigste beim Schweißen angesehen wird (Elektrodenkerndrahtdurchmesser \approx Bogenlänge).

Der in Bild 50 dargestellte Verlauf der Funktion $\eta_A = f(l_0)$ zeigt die Ausnutzung des Lichtbogens zum Aufschmelzen des Grundwerkstoffes. Es sind die Werte für den Wirkungsgrad η_A nur für die Normalschweißung ermittelt, da sich bei konstanter Schweißstromstärke die Querschnittsfläche des aufgeschmolzenen Grundwerkstoffes durch das Einfügen der Schaltelemente L und C in den Schweißkreis nicht ändert. Wählt man den elektrischen Anschlußkreis bei dieser Darstellung als Parameter, so ergeben sich auf Grund der unterschiedlichen Schweißspannungen bei gleicher Bogenlänge unwesentliche Parallelverschiebungen der Funktionen.

Die dem Wärmebedarf zum Abschmelzen der Elektrode entsprechende äquivalente Leistung $N_E + N_W$ in Abhängigkeit von der Bogenlänge zeigt Bild 51.

Die Veränderung des Abschmelzcharakters kommt in der Änderung der Kurzschlußanzahl pro Längeneinheit der Elektrode oder unter Berücksichtigung der Spritzverluste in der Änderung des Tropfengewichtes zum Ausdruck. Diese Änderung wird dadurch erzielt, daß die Materialübertragung während des Tropfenkurzschlusses durch die Wirkung des Kurzschlußstromes gesteuert wird. Das für den Werkstoffübergang zur Verfügung stehende schmelzflüssige Elektrodenmaterial wird dadurch nur teilweise oder vollständig vom Schmelzbad aufgenommen. Dies zeigt die Abhängigkeit der Schweißspannung von der Bogenlänge und wird durch die lupenmäßige Einzelauswertung von Zeitlupenfilmen bestätigt. Bereits JENNINGS [42] zeigte, ohne auf die Veränderung des Abschmelzcharakters hinzuweisen, daß die Schweißspannung abnimmt, wenn das Verhältnis von Kurzschlußstrom zu Schweißstrom ansteigt.

Außer der Kurzschlußstromstärke ist noch eine Reihe anderer sich gegenseitig bedingender und überlagernder Parameter für die Materialübertragung während des Tropfenkurzschlusses verantwortlich. Die Wahl der Versuchsbedingungen und die angewandte statistische Meßmethode tragen jedoch dafür Sorge, daß in den erzielten Untersuchungsergebnissen der Einfluß dieser Parameter auf eine Veränderung des Abschmelzcharakters nicht in Erscheinung tritt.

Die Wirkung der verschiedenen Parameter ist in den einzelnen Bewegungsphasen der Werkstoffübertragung unterschiedlich und läßt sich vorerst nur auf Grund wiederholter Betrachtungen von Zeitlupenfilmen und durch eine lupenmäßige Einzelauswertung derselben abschätzen.

Grundsätzlich vollzieht sich der Abschmelzverlauf für die untersuchte Elektrode in dem angegebenen Stromstärke- und Bogenlängeintervall, wie es auf den Seiten 11 bis 17 beschrieben ist. Charakteristische Ausschnitte aus Zeitlupenfilmen (Bildfrequenz 750 Bilder/s), wenn mit *C*, *L* und lediglich unter Benutzung des angegebenen Maschinentyps (Normalschweißung) mit einer Schweißstromstärke $J_S = 160$ A und einer Bogenlänge $l_o = 4,6$ mm geschweißt wird, zeigen die Bilder 52a bis 54n. Es sind drei Tropfenkurzschlüsse gegenübergestellt, die im allgemeinen vom elektrischen Anschlußkreis unbeeinflusst bleiben ($t_K > 3$ ms). Diese Kurzschlüsse sind ausgewählt, um auch bei einer Bildfrequenz von 750 Bildern/s die einzelnen Bewegungsphasen des übergehenden Elektrodenwerkstoffes besser erkennen zu können. Besonders aufschlußreich für die Diskussion der Ergebnisse sind die Bilder 52l, 53v und 54n. Sie zeigen das unmittelbar nach Tropfenabriß am Elektrodenende verbleibende Restvolumen, das den Anfang einer neuen Heizperiode bildet.

Beim Schweißen mit *C* (Bilder 52a bis 52l) stellt sich während des Tropfenkurzschlusses ein Strom ein, dessen Verlauf und Größe sich durch Addition des Entladestromes des Kondensators mit dem Kurzschlußstrom des Schweißgenerators ergibt (s. Bild 9). Der durch diesen Strom hervorgerufene Pinch-Effekt führt zur Einschnürung der Kurzschlußbrücke, bevor das für den Werkstoffübergang zur Verfügung stehende schmelzflüssige Elektrodenmaterial vom Schmelzbad vollständig aufgenommen wird. Da der Berührungsquerschnitt zu Beginn des Tropfenkurzschlusses im allgemeinen klein ist und die Einschnürung entsprechend dem Verlauf und der Größe des Kurzschlußstromes auch bei Beginn des Tropfenkurzschlusses sehr stark einsetzt, können die Oberflächenspannung und das eigene Tropfengewicht nicht zur Ausbildung einer massiven Werkstoffbrücke führen. Sowohl der kleine Querschnitt, durch den sich die Materialübertragung vollziehen kann, als auch die geringe Kurzschlußzeit ermöglichen nur eine teilweise Aufnahme des Materialvolumens, das für den Werkstoffübergang unmittelbar vor Beginn des Tropfenkurzschlusses zur Verfügung steht. Dadurch ist das nach Tropfenabriß verbleibende Restvolumen am Elektrodenende groß und führt zu einer der gemessenen Schweißspannung entsprechenden kurzen „mittleren Bogenlänge“ (Bild 52l). Letztere ist jedoch nicht meßbar und zur Charakterisierung des Abschmelzverlaufes ungeeignet, weshalb auf den Seiten 17 bis 20 ein anderer Abstand als Bogenlänge definiert und der gemessenen Schweißspannung zugeordnet wurde. Entsprechend der Größe des verbleibenden Restvolumens wird sehr oft eine Berührung zwischen dem schmelzflüssigen Elektrodenmaterial und dem Schmelzbad stattfinden und einen Werkstoffübergang herbeiführen.

Beim Schweißen mit C erfolgt also die Werkstoffübertragung während einer großen Anzahl von Kurzschlüssen, wobei während der einzelnen Kurzschlußzeiten nur ein kleines Kerndrahtvolumen vom Schmelzbad aufgenommen werden kann. Wie feintropfig die Elektrode in ihrem Abschmelzcharakter gestaltet werden kann, ist von der Größe des Kondensators und seines Vorschaltwiderstandes abhängig. Untersuchungen hierüber wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt.

Die Aufteilung eines großen Tropfens in mehrere kleinere Tropfen, wobei jeder kleine Tropfen bis zur Übertragung auf das Werkstück den Ansatzpunkt des Lichtbogens führt, bietet die Möglichkeit, die Austauschreaktionen zwischen dem Kerndraht und der Umhüllung zu beeinflussen. Der Ablauf der Austauschreaktion vollzieht sich hier jedoch grundsätzlich anders als beim feintropfigen Werkstoffübergang ohne Kurzschlußbildung.

Wird mit L geschweißt (Bilder 53a bis 53v), so weicht der Kurzschlußstrom nur unwesentlich vom Schweißstrom ab (s. Bild 8). Die einschnürende Wirkung des Kurzschlußstromes ist geringer als beim Schweißen mit C , und der sich zu Beginn des Tropfenkurzschlusses eingestellte Berührungsquerschnitt vergrößert sich durch das eigene Tropfengewicht, die Oberflächenspannung und das Fließen des Elektrodenwerkstoffes zu einer massiven Kurzschlußbrücke. Dadurch kann das für den Werkstoffübergang zur Verfügung stehende Elektrodenmaterial ungehindert vom Schmelzbad aufgesogen werden. Die weiteren Bewegungsphasen des übergehenden Elektrodenwerkstoffes sind durch eine Querschnittsverminderung der Werkstoffbrücke gekennzeichnet, analog einem Vorgang, der sich zeigt, wenn ein Tropfen von einer artgleichen Flüssigkeit aufgenommen wird. Der Werkstoffquerschnitt verengt sich schließlich auf einen solchen Wert, daß eine hinreichende Stromdichte zum Durchschmelzen der Werkstoffbrücke und damit zum Tropfenabriß führt, der dicht unterhalb des noch nicht aufgeschmolzenen Elektrodenendes erfolgt (Bild 53v). Dies ergibt eine „mittlere Bogenlänge“ und eine ihr entsprechende Schweißspannung, die bei gleicher gemäß Definition festgelegter Bogenlänge l_0 einen größeren Wert zeigt als beim Schweißen mit C (s. Bilder 35 bis 37).

Wird also unter Berücksichtigung des Maschinentyps zusätzlich eine Induktivität in den Schweißkreis eingefügt, so verändert sich der Abschmelzcharakter der Elektrode dahingehend, daß die Werkstoffübertragung innerhalb einer geringeren Kurzschlußanzahl stattfindet als beim Schweißen mit C . Da die Abschmelzgeschwindigkeit unabhängig vom elektrischen Anschlußkreis annähernd konstant bleibt, vergrößert sich unter Berücksichtigung der Spritzverluste das Tropfengewicht. Die in der Versuchsdurchführung verwandte Induktivität ergibt gleichzeitig die maximal mögliche Vergrößerung der Kurzschlußanzahl, da sich die Kurzschlußstromstärke beim Schweißen und der Schweißstrom nur unwesentlich voneinander unterscheiden.

Bei der Normalschweißung stellt sich entsprechend der ausgewählten Belastungscharakteristik des Schweißgenerators ein Strom ein, dessen Verlauf und Größe (s. Bild 7) den in den Bildern 54a bis 54n wiedergegebenen Abschmelzverlauf hervorruft. Das nach Tropfenabriß am Elektrodenende verbleibende Restvolumen hat durchschnittlich eine Größe, die kleiner ist als beim Schweißen mit C , aber größer als beim Schweißen mit L (Bild 54n). Analoge Betrachtungen, wie sie zur Deutung der Ergebnisse beim Schweißen mit C und L durchgeführt wurden, erklären auch für die Normalschweißung die dargestellten Ergebnisse.



Bild 52a

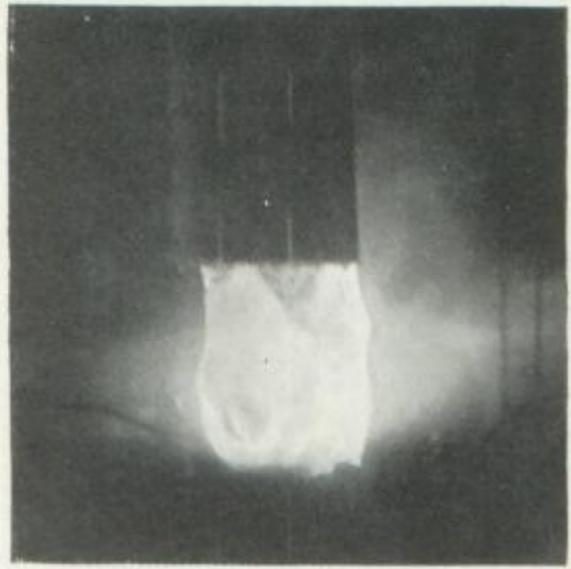


Bild 52b



Bild 52c

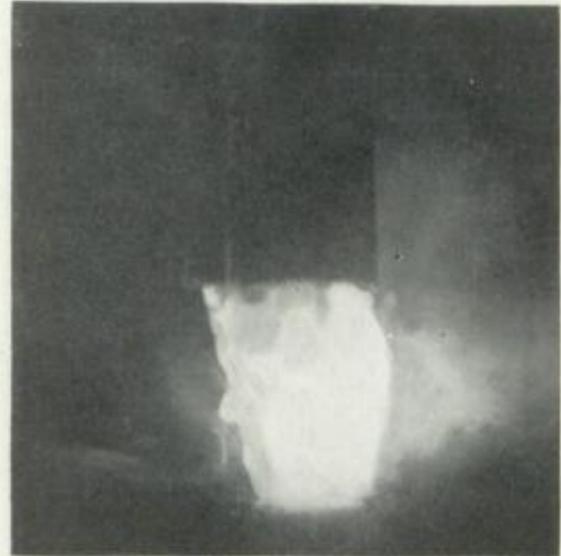


Bild 52d



Bild 52e



Bild 52f

Bilder 52a bis 52l. Schweißen mit *C*

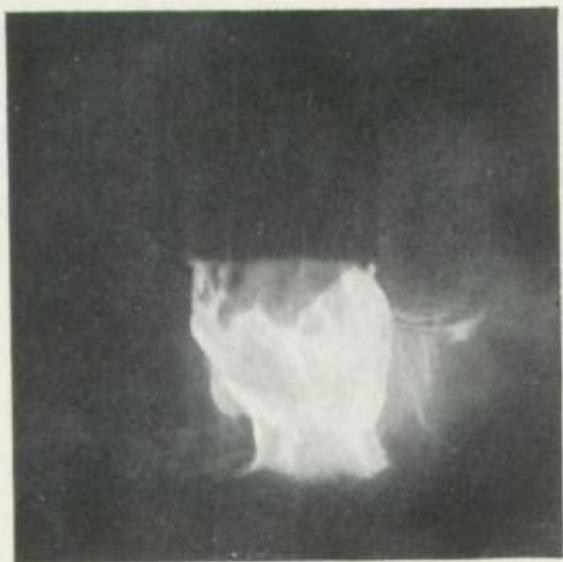


Bild 52g



Bild 52h

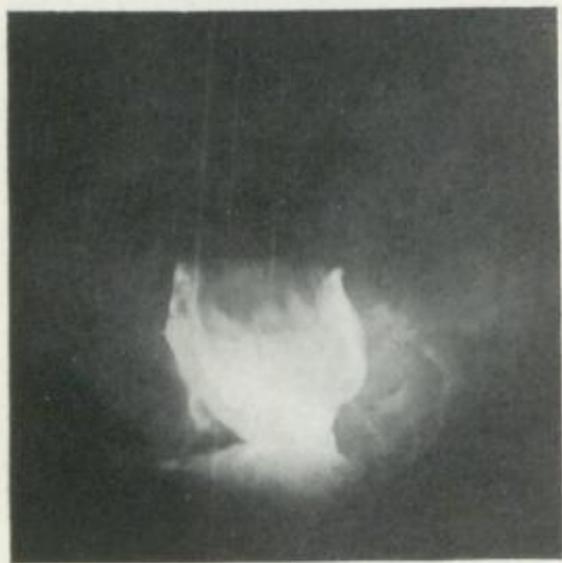


Bild 52i

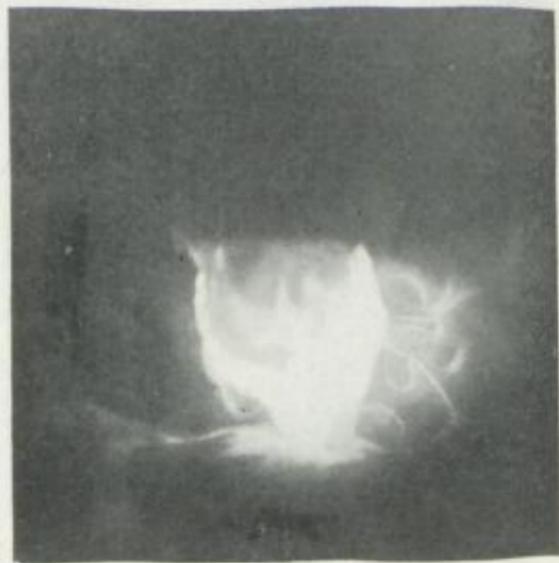


Bild 52j

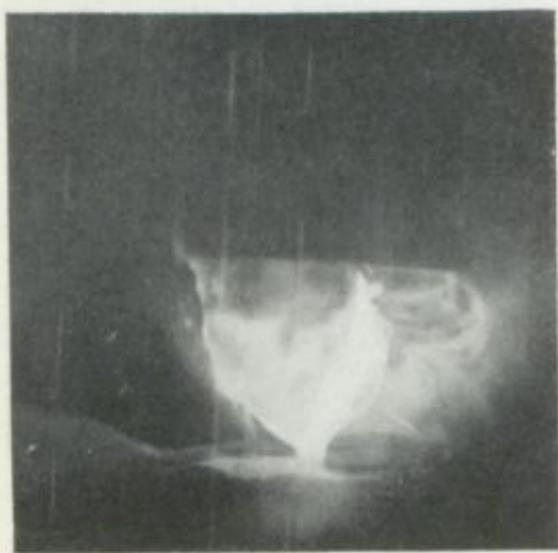


Bild 52k



Bild 52l



Bild 53a

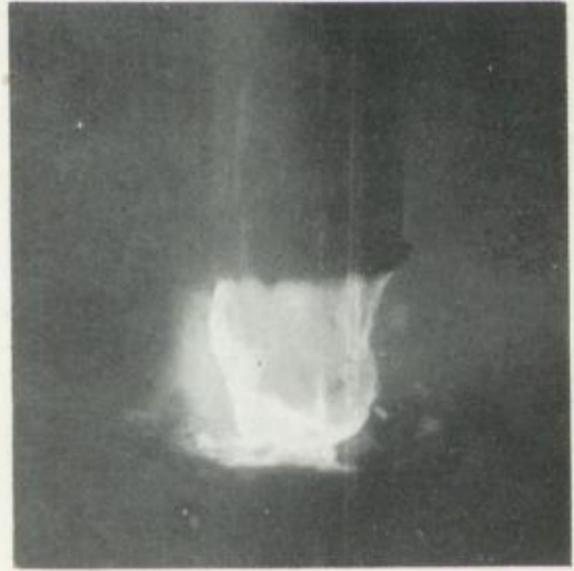


Bild 53b



Bild 53c

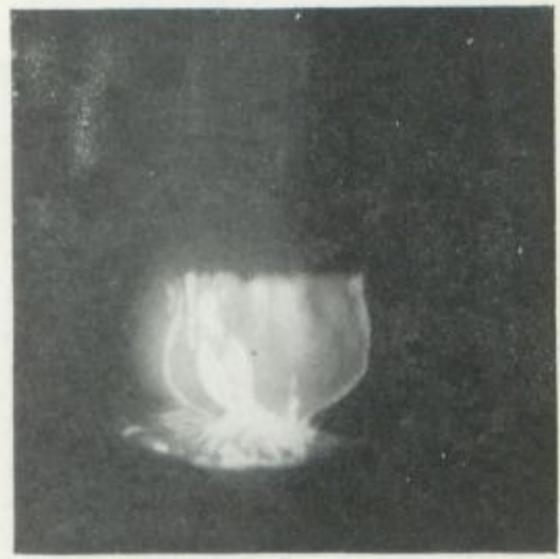


Bild 53d



Bild 53e

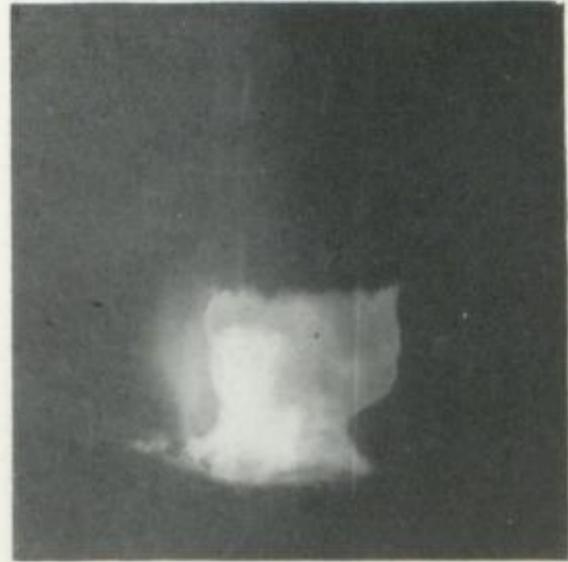


Bild 53f

Bilder 53 a bis 53 v. Schweißen mit *L*



Bild 53g

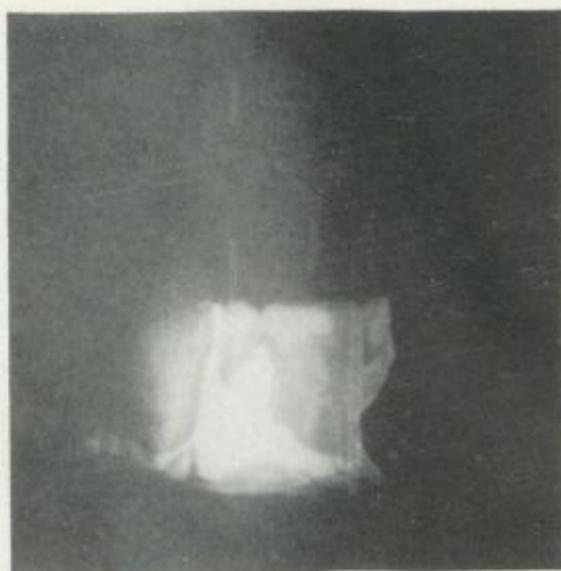


Bild 53h



Bild 53i

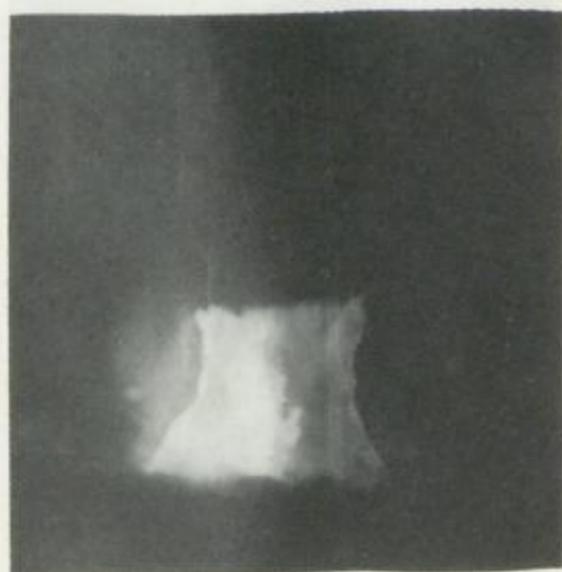


Bild 53j



Bild 53k



Bild 53l

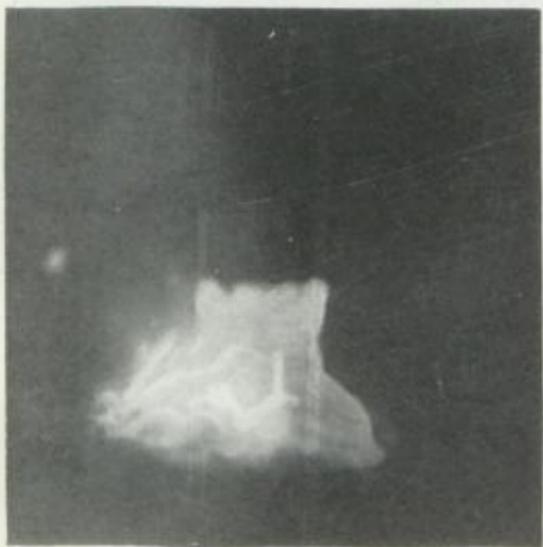


Bild 53 m



Bild 53 n



Bild 53 o



Bild 53 p



Bild 53 q



Bild 53 r



Bild 53s



Bild 53t



Bild 53u



Bild 53v



Bild 54a



Bild 54b

Bilder 54 a bis 54 n. Normalschweißung



Bild 54c

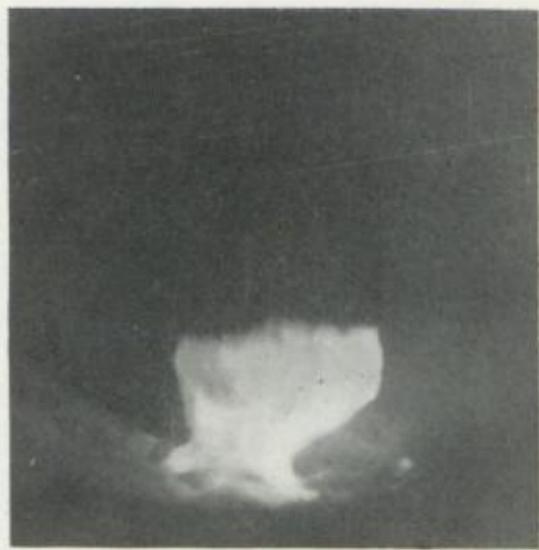


Bild 54d



Bild 54e



Bild 54f

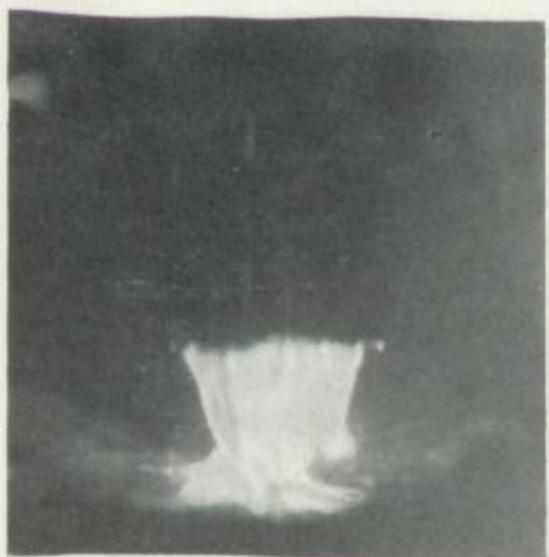


Bild 54g



Bild 54h



Bild 54i



Bild 54j

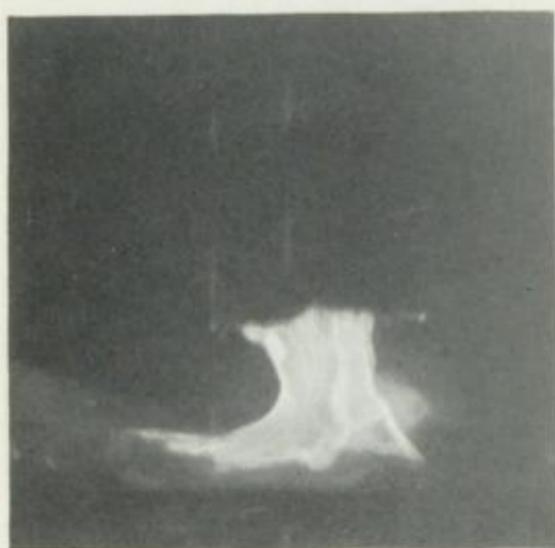


Bild 54k



Bild 54l



Bild 54m



Bild 54n

Ist die Kurzschlußzeit eines Tropfenkurzschlusses ≥ 3 ms, dann ist im allgemeinen ein hinreichend großer Berührungsquerschnitt zwischen Elektrode und Werkstück vorhanden, und das schmelzflüssige Elektrodenmaterial kann unabhängig vom elektrischen Anschlußkreis entgegen der einschnürenden Wirkung des Kurzschlußstromes vom Schmelzbad aufgenommen werden (s. Bild 46). Die Veränderung des Abschmelzcharakters erfolgt also durch die Einwirkung des Pinch-Effektes auf Tropfenkurzschlüsse, deren Kurzschlußzeiten bei der Normalschweißung größtenteils < 3 ms sind. Damit ist auch die in den Vorversuchen auf den Seiten 11 bis 17 auf Grund der Filmauswertung getroffene Feststellung, daß Tropfenkurzschlüsse, deren Dauer < 3 ms ist, keinen nennenswerten Beitrag zur Materialübertragung liefern, widerlegt. Der Verlauf der Schweißspannung und der Kurzschlußanzahl in Abhängigkeit von der Bogenlänge mit dem elektrischen Anschlußkreis als Parameter und die annähernd konstante Abschmelzgeschwindigkeit liefern den Beweis.

Teilweise läßt sich die durch das Schweißen mit L und das Schweißen mit C erzielte Veränderung des Abschmelzcharakters auch durch die Schweißstromstärke erreichen (s. Bild 42). Insbesondere für Bogenlängen, die bei automatischen Hochleistungsschweißverfahren (Schutzgas- und UP-Dünndrahtschweißung) Anwendung finden ($l_0 < 4$ mm), kann die Veränderung des Abschmelzcharakters mit Hilfe der Schweißstromstärke nur in sehr geringem Umfange vorgenommen werden. Einer Steuerung des Abschmelzcharakters durch die Schweißstromstärke ist durch die zulässige Grenzerwärmung des Elektrodeneinspannendes eine obere Grenze gesetzt. Die Grenzerwärmung bestimmt die Strombelastbarkeit der Elektrode. Diese ist mit Rücksicht auf die maximale Abschmelzgeschwindigkeit für jeden Elektrodentyp bei einem bestimmten Kerndrahtdurchmesser durch den höchstzulässigen Schweißstrom festgelegt. Eine Steuerung des Abschmelzcharakters mit Hilfe der Schweißstromstärke ist also praktisch nur durch eine Verringerung ihres Wertes möglich und geschieht auf Kosten der Abschmelzgeschwindigkeit.

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden experimentelle Untersuchungen zur Veränderung des Abschmelzcharakters von ummantelten Elektroden durch den elektrischen Anschlußkreis durchgeführt. Hierbei wurde der Einfluß des Anschlußkreises auf einen Elektrodentyp untersucht, deren Werkstoffübertragung unter Kurzschlußbildung erfolgt. Die Auswahl und Kennzeichnung der für die Versuchsdurchführung verwendeten Elektrode vom Typ Ti VII m, 4 mm Durchmesser, erfolgte in oszillographisch und filmisch durchgeführten Vorversuchen.

Es führen zwei Lösungswege, unabhängig vom Effektivwert des Schweißstromes, zu einer Veränderung des Abschmelzcharakters. Der erste Lösungsweg ist nur auf Elektroden, deren Werkstoffübertragung unter Kurzschlußbildung erfolgt, anwendbar. Hier wird die Veränderung des Abschmelzcharakters gegenüber der Normalschweißung dadurch erreicht, daß zusätzlich eine Induktivität in Reihe oder eine Kapazität parallel zur Bogenstrecke geschaltet wird. Der zweite Lösungsweg ist auf Elektroden anwendbar, deren Werkstoffübertragung mit und ohne Kurzschlußbildung erfolgt, und beinhaltet ein Verfahren zum Schweißen mit Stromimpulsen. Das Verfahren ist einer technisch brauchbaren Lösung zugeführt und für eine Anwendung in der Praxis geeignet. Da eine quantitative Erfassung des Abschmelzcharakters jedoch nicht möglich ist, sobald die Werkstoffübertragung ohne Kurzschlußbildung erfolgt, wurde nur der erste Lösungsweg eingehender untersucht. Zu diesem Zweck wurden Auftragschweißungen ausgeführt und in Abhängigkeit von der Bogenlänge die Kurzschlußanzahl und -zeit bei der Normalschweißung, beim Schweißen mit L und beim Schweißen mit C registriert. Zusätzlich erfolgte die Aufstellung der Energiebilanz des Schmelzvorganges. Der Spannungsschwellwert betrug für alle Versuchsreihen 10 V, der Zeitschwellwert 1 ms und 3 ms, die Schweißstromstärke wurde als Versuchsparameter gewählt. Für die Bogenlänge wurde nicht die Spannung als äquivalente Vergleichsgröße eingeführt, sondern ein Abstand als Bogenlänge definiert, in dessen Abhängigkeit sich sowohl der Abschmelzcharakter als auch die Schweißspannung ändern.

Die Größen, die allgemeingültig den Abschmelzverlauf der untersuchten Elektrode kennzeichnen, sind durch die Energiebilanz des Schmelzvorganges beschrieben, die gleichzeitig eine Aufteilung der für den Schmelzvorgang aufgenommenen Leistung vornimmt. Hiernach liefert die Nutzleistung der Stromwärme N_W keinen nennenswerten Anteil zum Abschmelzen der Elektrode. Den entscheidenden Anteil zum Abschmelzvorgang liefert die Nutzleistung des Lichtbogens N_E , die mit steigender Bogenlänge abnimmt. Der Lichtbogen wird um so schlechter zum Abschmelzen der Elektrode ausgenutzt, je größer die Schweißstromstärke ist. Die Nutzleistung des Lichtbogens N_A zum Aufschmelzen des Grundwerkstoffes durchläuft bei Schweißstromstärken, die

Bergakademie
- Bücherei -
Freiberg i. Sa.

dem Elektrodendurchmesser angepaßt sind, in Abhängigkeit von der Bogenlänge ein Maximum bei einem Wert, der auch empirisch als der günstigste beim Schweißen anzusehen ist.

Die Veränderung des Abschmelzcharakters wird durch die Änderung der Kurzschlußanzahl pro Längeneinheit der Elektrode oder unter Berücksichtigung der Spritzverluste durch die Änderung des Tropfengewichtes belegt. Der Abschmelzcharakter der untersuchten Elektrode wird mit Hilfe der angegebenen Schaltelemente durch die Regelung des zeitlichen Verlaufes und der Größe des Kurzschlußstromes während des Tropfenkurzschlusses verändert. Das für die Werkstoffübertragung zur Verfügung stehende Materialvolumen wird dadurch nur teilweise oder vollständig vom Schmelzbad aufgenommen. Wird mit C geschweißt, so erfolgt die Werkstoffübertragung während einer großen Kurzschlußanzahl, wobei während der einzelnen Kurzschlußzeiten nur ein kleines Kerndrahtvolumen vom Schmelzbad aufgenommen wird. Beim Schweißen mit L wird der Abschmelzcharakter so verändert, daß die Werkstoffübertragung bei praktisch gleicher Abschmelzzeit innerhalb einer geringeren Kurzschlußanzahl stattfindet als beim Schweißen mit C . Die Normalschweißung ergibt entsprechend der Belastungscharakteristik des Schweißgenerators einen Abschmelzcharakter, der sich durch ein mittleres Tropfengewicht auszeichnet, das größer als beim Schweißen mit C , aber kleiner als beim Schweißen mit L ist. Tropfenkurzschlüsse, deren Kurzschlußzeiten ≥ 3 ms sind, werden im allgemeinen in dem untersuchten Stromstärkeintervall durch den elektrischen Anschlußkreis nicht beeinflußt.

Die vorliegende Arbeit liefert einen ersten Beitrag zur Veränderung des Abschmelzcharakters von ummantelten Elektroden durch den elektrischen Anschlußkreis. Die weiteren Untersuchungen sollten sich auf geeignete Zusatzwerkstoffe, deren Kurzschlußzeiten < 3 ms sind, beschränken. Erst die Verwendung derartiger Zusatzwerkstoffe wird zeigen, in welchem Umfange eine Veränderung des Abschmelzcharakters gegenüber der Normalschweißung erreicht werden kann. In diesem Zusammenhang bedarf es der exakten Ermittlung der notwendigen Kapazität des Kondensators und der Größe des Vorschaltwiderstandes. Die Klärung der Frage, ob die maximale Größe des Kurzschlußstromes während des Tropfenkurzschlusses oder sein charakteristischer Verlauf den entscheidenden Anteil für die Veränderung des Abschmelzcharakters gewinnt, erfordert eingehende Untersuchungen, die für die weitere Verbesserung der Verfahrenstechnik und ihre Anwendung wertvoll erscheinen.

Für die interessante Aufgabenstellung und die vielen wertvollen Anregungen erlaube ich mir, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. F. ERDMANN-JESNITZER meinen ergebensten Dank auszusprechen.

Die Arbeit wurde im Zentralinstitut für Schweißtechnik der DDR, Halle (Saale), durchgeführt. Besonderer Dank gilt deshalb auch der Leitung und den Mitarbeitern dieses Institutes für die gebotene Möglichkeit der Durchführung der Arbeit und die zuteil gewordene Unterstützung.

Literatur

- [1] WACLAWIK, A.: Elektrotechnik und Maschinenbau 52 (1934) S. 525—529.
- [2] RYKALIN, N. N.: Berechnung der Wärmevorgänge beim Schweißen. VEB Verlag Technik, Berlin 1957.
- [3] SEELIGER, R.: Handbuch der Experimental-Physik, Bd. 13, 3. Teil. Akadem. Verlagsgesellschaft, Leipzig 1929.
- [4] SEELIGER, R., und WULFHECKEL, H.: Ann. d. Physik, 5. Folge, Bd. 6 (1930) S. 87—104.
- [5] HOLM, R., GÜLDENPFENNIG, F., und STÖRMER, R.: Wiss. Veröff. Siemens-Werke XIV, 1 (1935) S. 53.
- [6] COMPTON, K. T., und VAN VOORHIS, C. C.: Proc. Nat. Acad. Sc. 13 (1927) S. 336—341.
- [7] LEFRING, N.: Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des Ingenieurwesens, hg. vom VDI, VDI-Verlag Berlin (1930), 332, S. 1—53.
- [8] BUNG, K.: Elektrotechnik und Maschinenbau 46 (1928) S. 490—495.
- [9] PFLUG, H., und SEELIGER, R.: Wiss. Veröff. Siemens-Werke XX, 7 (1941) S. 171—185.
- [10] DOAN, G. E., und MURRAY WEED, J.: The Welding Journal 17 (1938) 1, S. 15_a—19_a.
- [11] PATON, E. O.: Automatische Lichtbogenschweißung. VEB Carl Marhold Verlag, Halle (Saale) 1958.
- [12] MCMASTER, R. C., MARTIN, D. C., und LEATHERMAN, A.: The Welding Journal 28 (1949) 12, S. 575_a—583_a.
- [13] HUDSON, R. G.: Journal of the Welding Society 1 (1919) S. 6—10.
- [14] BUNG, K.: VDI-Z, Bd. 72 (1928) S. 750.
- [15] HILPERT, A., und THUN, R.: VDI-Z, Bd. 73 (1929) S. 7.
HILPERT, A.: VDI-Z, Bd. 73 (1929) S. 798—799.
- [16] SACK, J.: Journees de la Soudure organisee (1938) Jun. S. 439—443.
- [17] VAN DER WILLIGEN, P. C., und DEFIZE, L. F.: Philips' Techn. Rundschau 15 (1953) Nr. 3, S. 73—104.
- [18] EROCHIN, A. A., PETROW, A. W., und BOGATSCHEW, M. H.: Awtomatitscheskaja Swarka 7 (1954) S. 59—63.
- [19] ERDMANN-JESNITZER, F.: Schweißtechnik 3 (1953) 6, S. 164—171.
- [20] FLAMM, P.: Schmelzschweißung 9 (1930) S. 105.
- [21] CREEDY, F., LERCH, R. O., SECEL, P. W., und SORDON, E. P.: Trans. Amerc. Inst. Electr. Engr. 51 (1932) S. 556 bis 566.
- [22] DOAN, G. E.: J. Amerc. Inst. Electr. Engr. 49 (1930) S. 453.
- [23] PATZKEWITSCH, J. R.: Awtomatitscheskaja Swarka 7 (1954) S. 33—41.
- [24] NIEBURG, F.: Diss. TH Berlin 1938, Druck Triltsch & Hather, Berlin 0 27.
- [25] ERDMANN-JESNITZER, F., und PRIMKE, K.: Schweißtechnik 6 (1956) 12, S. 353—361.
- [26] VON ENGEL, A.: Wiss. Veröff. Siemens-Werke XVI (1937) S. 70—88.
- [27] VON CONRADY, H.: Elektroschweißung 8 (1937) 6, S. 101—106 und 8 (1937) 7, S. 125—128.
- [28] SACK, J.: Philips' Techn. Rundschau 4 (1939) Nr. 1, S. 18—24.
- [29] LE COMPTE, H., und RÖLL, W.: Werkstoff und Schweißung, Bd. 1, S. 197—122, hg. von Erdmann-Jesnitzer, Akademie-Verlag, Berlin 1951.
- [30] SONDEREGGER, A.: Schweiz. Arch. f. angew. Wissenschaft und Technik, 6 (1940) 12, S. 325—331.
- [31] LORENZ, W.: Schweißtechnik 2 (1952) 5, S. 130—135.
- [32] WEINSCHENK, H.-E.: Academia R. P. R., Baza Timisoara Studii Si Cercetari Stiintifice, Tomul IV, (1957) Nr. 3 bis 4, S. 15—32.
- [33] LAPIDUS, W. A.: Avtogennoje delo, Moskau (1950) Nr. 12.
- [34] FINKELNBURG, W.: Hochstrom-Kohlebogen. Springer-Verlag, München 1948.
- [35] WYANT, R. A., WINDSOR, L. P., und SCHETKY, L.: The Welding Journal 27 (1948) 10, S. 502_a—514_a.
- [36] MÜLLER, L.: Über die elektrischen Vorgänge in den Stromkreisen der Lichtbogen-Schweißdynamo. Konrad Triltsch-Verlag, Würzburg 1934.
- [37] WEINSCHENK, H.-E.: Schweißtechnik 6 (1956) 2, S. 37—40.
- [38] WEINSCHENK, H.-E.: Unveröffentlichte Untersuchungen.
- [39] WEINSCHENK, H.-E.: Unveröffentlichte Untersuchungen.
- [40] KÖHLER, E., und MARTIN, E.: Wissenschaftl. Zeitschr. d. Techn. Hochschule Dresden 7 (1957/58) 3, S. 535—542.
- [41] MOELLER, F.: Taschenbuch für Elektrotechniker, Bd. 1. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1952.
- [42] JENNINGS, C. H.: The Welding Journal 30 (1951) 2, S. 117—138.

✓

Bücherel
Bergakademie
Freiberg i. Sa.

