

Die max. Temperatur-Belastbarkeit von Bondungen mit dieser Lotpaste kann etwa $\vartheta_{\max} = 130^\circ\text{C}$ betragen.

5. Schlußfolgerungen

Die Versuchsergebnisse zeigen, daß Gallium-Metallmischungen als Lotwerkstoff für Niedrigtemperaturlötungen geeignet sind. Die in der Literatur genannten hohen Aufschmelztemperaturen der verfestigten Mischungen konnten allerdings nicht erreicht werden. Es traten bereits bei niedrigen Temperaturen Galliumausschwitzungen auf, die für den vorgesehenen Einsatzzweck gleichzeitig die max. Gebrauchstemperatur bedeuten. Wie die Ausschwitzungen zu verhindern sind, ist noch unklar. Eventuell sind höhere Auslagerungstemperaturen erforderlich, die wahrscheinlich — neben der vollständigen Galliumumsetzung — auch zur Bildung von Hochtemperaturphasen benötigt werden.

Der allgemeinen Einführung von Loten auf Galliumbasis in der Mikroelektronik stehen z. Z. aber mehr technologische als Werkstoffprobleme entgegen. Durch Verwendung geeigneter Metallpulver dürften ausreichende Topfzeiten und durch Optimierung der Lot- oder Auslagerungsbedingungen höhere Gebrauchstemperaturen zu erzielen sein.

Eine Benetzung der in Frage kommenden Werkstoffe durch Gallium erfolgt jedoch nur durch intensives Aufreiben der Gallium-Metallpaste. Ein geeignetes produktives Auftrags- und Aufreibverfahren zur Belotung von Substratwerkstoffen steht aber z. Z. nicht zur Verfügung.

6. Zusammenfassung

Neuere Arbeiten zum Niedrigtemperaturlöten mit Gallium-Loten gründen sich auf Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Dentallegierungen. Es wird eine umfassende Darstellung von Veröffentlichungen gegeben, die sich auf Anwendungen in der Elektronik und der Vakuumtechnik beziehen.

Eigene Arbeiten umfaßten die Auswahl geeigneter Metallpulver, Anmischversuche und Versuche zum Verfestigungsablauf. Ergebnisse von Lötversuchen mit einer Gallium-Nickel-Lotpaste zur Rückseitenkontaktierung von integrierten Schaltkreisen auf Keramiksubstrate werden mitgeteilt.

Literatur

- [1/] *Smith, D. L., und Caul, H. J.*: Alloys of gallium with powdered metals as possible replacement for dental amalgam (Legierungen von Gallium mit Metallpulvern als möglicher Ersatz für Dentalamalgam). J. Am. Dental Ass 53 (1956) S. 315—324.
- [2/] *Smith, D. L., u. a.*: Some physical properties of Ga-Cu-Sn alloys (Einige physikalische Eigenschaften von Ga-Cu-Sn-Legierungen). J. Am. Dental Ass (1956) S. 677—685.
- [3/] *Harman, G. G.*: Hard Gallium Alloys for Use as Low Contact Resistance Electrodes and for Bonding Thermocouples into Samples (Harte Galliumlegierungen als Elektroden mit niedrigem Kontaktwiderstand und zum Anbringen von Thermoelementen in Prüfkörpern). Rev. Sci. Instr. 31 (1960) 7, S. 717—720.
- [4/] *Harmann, G. G.*: Some Comments of the Use and Preparation of Hard Gallium Alloys (Einige Bemerkungen zur Anwendung und Herstellung von harten Galliumlegierungen). Rev. Sci. Instr. 32 (1961) 4, S. 465—466.
- [5/] *Benedic, S.*: Lotähnliches Verbinden verschiedener Werkstoffe ohne Wärmezufuhr. Techn. Rdsh. Bern 3. 2. 1961, S. 11—12.
- [6/] *Tichomirova, O. I., u. a.*: Löten von Kupfer mit Kupfer-Gallium-Lot. Svar. Proiz. 37 (1967) 10, S. 16—18.
- [7/] *Gršćimalski, L. L., u. a.*: Löten von Materialien unter Druck mit Gallium-Lotpaste. Svar. Proiz. 39 (1969) 10, S. 39—41.
- [8/] *Tichomirova, O. I.*: Gallium-Lote, deren Eigenschaften und Verwendung. Svar. Proiz. 41 (1971) 2, S. 49—50.
- [9/] *Shafraan, A.*: Electronic Interconnection at Room Temperature with Gallium Alloy (Elektrische Zwischenverbindungen bei Raumtemperatur mit Gallium-Legierung). 1965 IEEE Int. Conv. Rec. Pt 10, p. 119—127.
- [10/] *Hansen, M.*: Constitution of Binary Alloys (Struktur binärer Legierungen). McGraw-Hill Book Comp. Inc. N.Y. 1958. SwA 10972

Dr. rer. nat. Hans-Dieter Langer
VEB Kondensatorenwerk Freiberg

Stumpfschweißen in der Kondensatorindustrie Grundlagen und Anwendung

Bezeichnungen			
A	mm ²	Querschnitt	
A_W	mm ²	wahre Berührungsfläche	
C	μF	Kapazität	
d	mm	Durchmesser	
E_p	W.s	Primärenergie	
E_S^T	W.s	Schweißenergie für $t = \tau$	
I	A	Stromstärke	
$I_S \text{ max}$	kA	max. Schweißstrom	
l	mm	Einspannlänge	
$N_S \text{ max}$	kW	max. Schweißleistung	
F	N	Preßkraft	
F_N	N	Nachführpreßkraft	
F_V	N	Vorpreßkraft	
F_{90°	N	90°-Bruchlast	
R	m Ω	Widerstand	
R_t	m Ω	Primärkreiswiderstand	
R_S°	m Ω	anfänglicher Berührungswiderstand	

R_S	m Ω	Schweißwiderstand
t	s	Zeit
t_I	s	Inkubationszeit
T	$^\circ\text{C}$	Temperatur
U_p	V	anfängliche Primärspannung
$U_S \text{ max}$	mV	max. Schweißspannung
τ	ms	Stromwirkzeit
η^T	%	Wirkungsgrad für $t = \tau$
Δt	s	Phasenanschnittszeit

0. Einleitung

Die Bedeutung zuverlässiger Schweißverbindungen in der Kondensatorindustrie geht u. a. daraus hervor, daß es sich in vielen Fällen bewährt hat, das konstruktive Bauelementekonzept und den technologischen Prozeßablauf primär auf die Schweißtechnologie abzustimmen. Dadurch wird z. B. der Miniaturisierungstendenz, der Bauelementezuverlässigkeit und dem rationalen Fertigungsdurch-

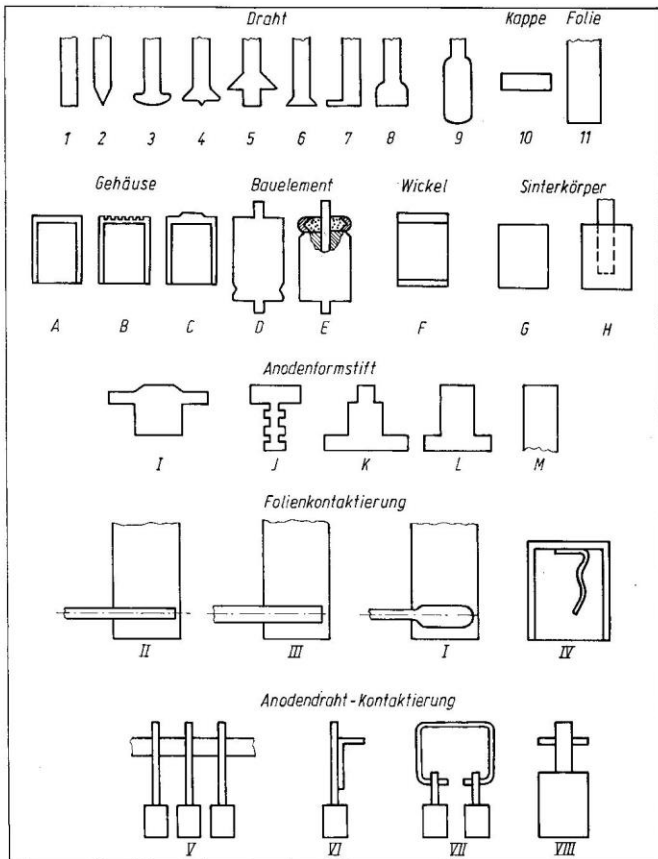


Bild 1. Typische Füge- und Schweißverbindungsvarianten der Kondensatorindustrie

Bild 2. Schweißstromdiagramme und Ersatzschaltbilder einiger in der Kondensatorindustrie verbreiteter elektrischer Schweißverfahren
 I Wechselstrom, II Wechselstrom mit Phasenanschnitt, III transformierter Impulsstrom (Kondensatorentladung) $d_{Cu} = 0,8 \text{ mm}$, IV transformierter Impulsstrom (Kondensatorentladung) $d_{Cu} = 0,6 \text{ mm}$, V Lichtbogenstrom (Kondensatorentladung), VI Wechselstrom indirekt

lauf maximal Rechnung getragen /1/. Die Verfahrenstechnologie beim Schweißen richtet sich grundsätzlich nach der stofflichen Zusammensetzung und nach der geometrischen Form der Füge- und Bauteile, wobei die technischen Daten den physikalisch-chemischen Eigenschaften der zu verbindenden Werkstoffe anzupassen sind. Der in der Massenfertigung geforderte Automatisierungsgrad bedingt weitere Voraussetzungen wie Taktzeit (kontinuierliche oder diskontinuierliche Schweißteilzuführung und -abführung, Verkettung mit vor- und nachgelagerten Arbeitsgängen) sowie Betreuungs- und Bedienungsbedingungen (Mensch-Maschine-System im Sinne von prophylaktischem Verschleißteilaustausch, fortlaufender Maschinenüberwachung und zyklischer Stichproben-Festigkeitsprüfung). Obgleich diese Anforderungen in der Praxis nur näherungsweise erfüllt werden können, wurden in der Kondensatorindustrie zahlreiche spezifische Schweißprobleme zufriedenstellend gelöst /2/.

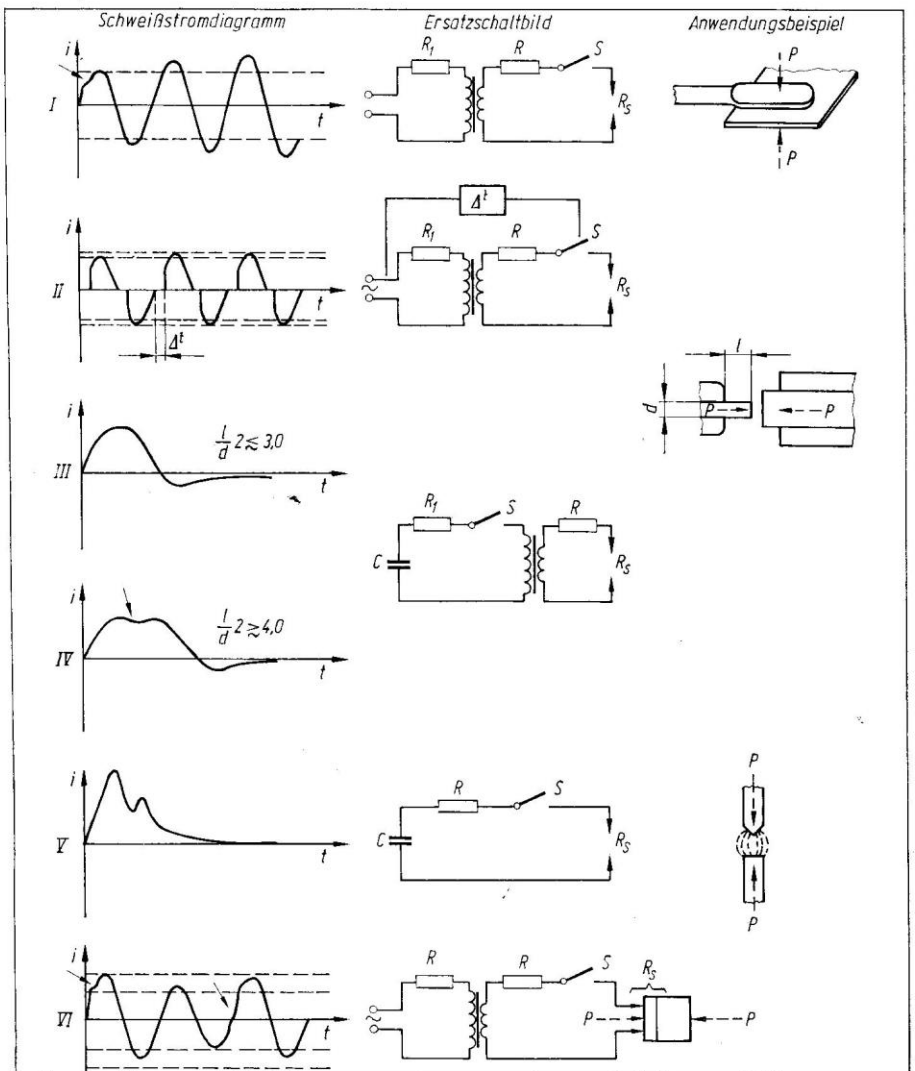
1. Übersichtsbetrachtungen zur Schweißproblematik

Bild 1 zeigt eine Auswahl typischer Füge- und Schweißvarianten der Kondensatorindustrie.

Die häufigste Aufgabe besteht in einer stumpfen Verbindung von Anschlußdrähten (Teile 1 bis 8) mit Formteilen wie Kappen (Teil 10), Gehäusen im offenen (Teile A bis C) oder geschlossenen Zustand (Teile D und E) bzw. ohne (Teile A und B) oder mit Nippel (Teile C und D) bzw. mit überstehendem Wickeldorn (Teile E bzw. M), dessen Stelle auch Anodenformstifte (Teile I bis L) einnehmen können. Dazu gehören auch Sinterkörper mit einer Porosität von 30 bis 60 Prozent (Teil G) bzw. Drähte, die in Sinterkörpern (Teil H) oder Dichtgummis (Teil E) eingebettet sein können. Beim Stumpfschweißen hat im allgemeinen das Formteil eine ebene Oberfläche, während der Draht ebenfalls stumpf geschnitten (Teil 1) bzw. mit einseitig ebenem Stauchkopf (Teile 5 und 6) oder mit spezifisch geformtem Kopf (Teile 2 bis 4) eingesetzt wird. Ebenso wie der Kopfdraht eine Anpassung an verfahrenstechnische, metallurgische und festigkeitserhöhende Gegebenheiten darstellt, können spezielle Vorkehrungen am Formteil wie Rillen (Teil B) oder Erhebungen (Teil C) die Verteilung der thermischen, elektrischen und Massenströme günstig beeinflussen.

In manchen Fällen sind Drähte mit kurzem, flachem Quer- bzw. Längsstauchkopf (Teile 7 und 8) an Kappen (Teil 10) oder Gehäusen (Teil A) bzw. längsseits am Mantel von Drähten (Teile 1 und F) zu befestigen. Hierfür eignet sich am besten das Punktschweißverfahren, das auch große Verbreitung bei der parallelen Verbindung von Anschlußdrähten (Varianten I und II) mit langem flachem Stauchkopf („paddle tape“, Teil 9) bzw. ohne Stauchkopf (Teil I) an Folien (Teil II), metallisierte Wickelstirnflächen (Teil F) bzw. andere ebene Teile (z. B. Teil 10) sowie bei der Realisierung der Verbindungsvarianten V bis VIII (Draht-Draht, Draht-Blech) gefunden hat.

Anschlußflächen werden in Form von dünnen Folienstreifen an sehr dünne und/oder poröse Folien (Variante III) oder an andere ebene Oberflächen (z. B. Gehäusekontaktierung gemäß Variante IV) vorteilhaft mit Hilfe der Ultraschalltechnik geschweißt.



Eine nicht unerhebliche Anwendung findet auch heute noch das Kaltpreßschweißen, z. B. zum Verbinden von Anschlußdrähten bzw. Wickeldornen mit dünnen Folien (Variante II), die mehr als 50 Prozent Porosität aufweisen können.

Eine Auswertung internationaler und nationaler Produktionserfahrungen, die zum Teil über den Kondensatorbereich hinausgehen, sowie eigener experimenteller Ergebnisse /2/ ergab ohne Anspruch auf Vollständigkeit eine Übersicht über die Eignung der verschiedenen Schweißverfahren für diverse Verbindungsvarianten entsprechend Bild 1 und Tafel 1. Die Tafel enthält in der dritten Spalte einige typische Anwendungsfälle, die vor allem in der Kondensatorfertigung bekannt sind. In Tafel 2 findet sich eine Beurteilung der Eignung verschiedener Verfahren zum Stumpfschweißen von Anschlußdrähten entsprechend der in den Skizzen veranschaulichten Schweißteilabmessungen. Die Einschätzungen „gut“ bzw. „schlecht“ sind mehr grundsätzlicher Natur, während die Einstufung „bedingt“ eine Eignung bei entsprechendem apparativem Aufwand offen läßt.

Bei den Verfahren mit dominierender elektrischer Energiezufuhr werden die Amplitude und die zeitliche Verteilung der Schweißleistung wesentlich durch den zeitlichen Verlauf der Schweißstromstärke bestimmt /1/. Dem Konstrukteur stehen zahlreiche Varianten für das Stromversorgungssystem zur Verfügung. Die in der Kondensatorindustrie verbreitetsten sind im Bild 2 durch ihre vereinfachten Ersatzschaltbilder veranschaulicht. Die Zeitabhängigkeit des Schweißwiderstands R_s von thermischen und mechanischen Vorgängen im Grenzflächenbereich und im Volumen der Fügeteile beeinflusst die Stromkreiseigenschaften, wie aus den qualitativ dargestellten Schweißstrom-Diagrammen zu entnehmen ist. Einzelheiten wurden in /1/ diskutiert.

2. Anwendungsgrundlagen der Stumpfschweißverfahren

Wegen der überragenden Bedeutung der Widerstands- und Lichtbogen-Verfahren für das Stumpfschweißen von Anschlußdrähten lohnt sich eine vergleichende Diskussion zu den fundamentalen Phänomenen und Einflußgrößen im Hinblick auf die technische Anwendung. Allgemein gültige Angaben sind wegen der Vielschichtigkeit des Problems nicht ohne Vorbehalt zu machen. Abschätzungen im Rahmen von Modellvorstellungen können jedoch wesentliche Hilfestellungen für den im übrigen auf Intuition und Erfahrungen angewiesenen Entwickler leisten. Die Schweißtemperatur ist die zentrale makroskopische Größe. Sie wird durch die Bilanz der Energieströme bestimmt. Bezüglich des Betrages der unterschiedlich gearteten Energieströme (elektrisch, thermisch, mechanisch, magnetisch), die zur stofflichen Verbindung (Adhäsion, Diffusion, Massenkonzentration) im Berührungsbereich der Fügeteile führen, sind starke und schwache Wirkungen zu unterscheiden, die zugleich bzw. nacheinander, notwendig bzw. unerwünscht im Prozeß hervortreten. Die Kenntnis dieser Phänomene ist eine wesentliche Dimensionierungs- bzw. Optimierungsgrundlage.

Die Energiebilanz ist positiv, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

a) Widerstandspreßschweißen

Der elektrische Energiestrom bewirkt durch Temperaturerhöhung die Herabsetzung des Formänderungswiderstands und hält die Interdiffusionstemperatur bis zum Abschluß der Wulstbildung aufrecht.

Die mechanische Energie sorgt für die Einstellung eines geforderten anfänglichen Berührungswiderstands durch Kaltverformung (Vorprißkraft) und im weiteren Schweißablauf (Nachführprißkraft) durch ausreichenden radialen Materialfluß (Wulstbildung) bei kontinuierlicher Stoffberührung im Wirkungsbereich metallischer Bindungskräfte dafür, daß die wahre Berührungsfläche der Fügeteile stetig zunimmt, bis der Materialvorrat (Einspannlänge) aufgebraucht ist.

b) Lichtbogen-Stoßschweißen¹

Die den Bogen repräsentierende elektrische Energie bewirkt die Ausbildung ausreichender Schmelzvolumina an beiden Fügeteilen und übersteigt noch unmittelbar vor dem Löschen des Bogens (Berührung der Schmelzen) die Energieverlustströme.

Die mechanische Energie steuert die Bogenentladung durch Einhaltung einer in Relation zur Kondensatorladung stehenden An-

Tafel 1. Übersicht zur Eignung von Schweißverfahren für einige Verbindungsvarianten und Materialkombinationen

Verfahren	Verbindungsvariante (Teile- bzw. Variantenbezeichnung gemäß Bild 1)	Materialkombination als typischer Anwendungsfall
Impuls-Widerstandsschweißen	1/A bis L (außer B und F)	Cu(Sn)-Al, Ta-Ta
	1/10	Cu(Sn)-Stahl(Ni)
	3,6/G	Ta-Ta
Wechselstrom-Widerstandsschweißen	1/A bis M (außer B und F)	Cu(Sn)-Al, Ta-Ta
	3,6/G	Ta-Ta
	6/B	Ni(Sn)-Ag
	7/A, C	Cu(Sn)-Cu(Sn)
	8/1, H	Ni(Sn)-Ta
	9/11 (Variante I)	Cu(Sn)-Al
	1/11 (Variante II)	Cu(Sn)-Al, Cu
	1/1 (Variante V)	Ta-Ta-Stahl, Al
	Variante VI	Ta-Ta, Stahl, Al
	Variante VII	Cu(Sn)-Ta
Variante VIII	Ni(Sn)-Ta	
Widerstandsschweißen indirekt	10/G	Ta-Ta
	9/F	Cu(Sn)-Sn
Lichtbogenschweißen	1/2	FeNi-Cu, Ni
	2/C bis E, I bis M	Stahl (Cu, Sn)-Al
	4/G	Ta-Ta
	5/D, E	Cu(Sn)-Al
Kaltpreßschweißen	1, M/11 (Variante II)	Al-Al
	1/11 (Variante II)	Cu(Sn)-Cu, Al
Ultraschallschweißen	11/11, A bis C (Variante III und IV)	Al-Al

¹ In Klammern Angabe der Fügeteilbeschichtung

Tafel 2. Eignung verschiedener Verfahren zum Stumpfschweißen von Anschlußdrähten (Anwendererfahrungen und eigene experimentelle Ergebnisse)

Schweißteil/metallurgische Komponente						Verfahren	Schweißbarkeit
A	B	C	D	E	F		
—	Cu	Sn	—	div. Stähle	Ni	WPI/WPW ¹	gut
—	Cu	Sn	—	div. Stähle	Zn	WPI/WPW	gut
—	Cu, Ni	Sn	—	div. Stähle	—	WPI/WPW	gut
—	Cu	Sn	—	Ms	Ag, Sn	WPI/WPW	gut
—	Cu	Sn	—	MS	Ni	WPI/WPW	schlecht
—	Cu	Sn	—	MS	Zn	WPI	gut
—	Cu	Sn	—	Fe	Ni	WPI/WPW	gut
—	Fe	Sn	—	Fe	MS	WPI/WPW	gut
—	Fe	Sn	—	Fe	Ni	WPI/WPW	schlecht
—	Cu	Sn	—	Cu	Ag	WPW/WPW	schlecht
Cr-Ni	Cr-Ni	—	—	—	—	WPW	gut
Fe-Ni	Ni	—	—	—	—	LS ¹	gut
Fe-Ni	Cu	—	—	—	—	LS	gut
—	Cu	Sn	Al	—	—	WPI	gut
—	Cu	Sn	Al	—	—	WPW	bedingt
—	Cu	Sn	Al	—	—	LS	schlecht
—	Cu	—	Al	—	—	WPI	gut
—	Cu	—	Al	—	—	LS	schlecht
—	Fe	Sn	Al	—	—	WPI	bedingt
—	Fe	Sn	Al	—	—	LS	gut
—	Cu	Sn	—	Ag	—	LS	gut
—	Ni	Sn	—	Ag	—	LS	gut
Ta	Ni	Sn	—	—	—	LS	schlecht
Ta	Ni	Sn	—	—	—	WPW	bedingt
Ta	Cu	Sn	—	—	—	WPW	bedingt
Ta	Cu	Sn	—	—	—	LS	gut

¹ WPI Widerstandspreßschweißen mit Impuls
WPW Widerstandspreßschweißen mit Wechselstrom
LS Lichtbogen-Stoßschweißen

¹ im englischen Sprachgebrauch „Perkussionsschweißen“.

näherungsgeschwindigkeit der Fügeteile und durchmischt zum Abschluß die Schmelzen unter Ausbildung eines notwendigen Berührungsvolumens nach dem Erstarren.

Von nicht zu unterschätzender Bedeutung ist bei beiden Verfahren der mechanische Energiebeitrag zur Kompensation von Unregelmäßigkeiten der Fügeteil- (vgl. Bild 1) bzw. Schmelzzonengeometrie und zur abschließenden Materialverfestigung im Gefüge. Daneben sind einige Störfaktoren zu nennen, die letztlich die Verbindungsfestigkeit wesentlich beeinträchtigen können:

- | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Widerstandspreßschweißen | Lichtbogen-Stoßschweißen |
| - zu hohe Toleranzen (Formänderungswiderstand, Einspannlänge, Fügeteilerfläche, Übergangswiderstand/industrielle Kontamination) | - Unsymmetrien der Fügeteilerflächen |
| - Knicken des Drahts | - Materialverluste durch Verspritzen |
| - mangelhafte Kraftschlüssigkeit im Preßkraftsystem | - Bogenfluktuationen |
| - Rutschen bzw. Prellen der Fügeteile/elastisches Nachgeben der Klemmvorrichtungen | - Lunkenbildung |
| - Kerbwirkung bzw. zu hoher elektrischer Widerstand der Klemmvorrichtungen | - Unregelmäßigkeiten der Schmelzenoberflächen |
| - Rekristallisationsentfestigung | - Versprödung durch Gase bzw. intermetallische Verbindungen |
| - Oxydation der Berührungsfleichen /3/ | - Prellen der Fügeteile während des Erstarrungsprozesses |
| | - zu hohe Oberflächenspannung (Benetzungsbeeinträchtigung flüssig/fest) |
| | - Brückenbildung der Schmelzen /4/ |

Ungeachtet der breiten Palette der Einflußgrößen und der Nichtgleichgewichtscharakteristik des Stumpfschweißens von Anschlußdrähten lohnt sich bei der Schweißbarkeitsbeurteilung eines Stoffsystems stets ein Blick auf das Zustandsdiagramm der beteiligten Komponenten (binäre Zustandsdiagramme, z. B. in /5/ /6/). Wie aus Tafel 2 ersichtlich, kann die Zwischenschaltung einer mit Hilfe der Zustandsdiagramme ausgewählten Komponente *F* entscheidend zur Schweißbarkeit zweier sonst wenig verträglicher Stoffe beitragen. Signifikante Aussagen des Zustandsdiagramms sind z. B. Mischbarkeit (vollständig, teilweise, unmischbar), Existenz spröder intermetallischer Verbindungen, Schmelztemperatur. Im Bild 3 wurden die Zustandsdiagramme den Schweißverbindungsstrukturen einiger Stoffpaare schematisch gegenübergestellt. Das Zeichen „(+)" bedeutet gute, „(-)" bedeutet schlechte Schweißbarkeit im Sinne der reproduzierbar erzielten Verbindungsfestigkeit. Diese Einschätzung wird im folgenden Abschnitt begründet und beruht auf eigenen experimentellen Untersuchungen.

3. Anwendungsbeispiele zum Stumpfschweißen (Tafel 2)

a) Cu(Sn) – Ta

Cu und Ta sind nicht mischbar und daher für das WP² nicht geeignet (keine Interdiffusion zu erwarten). Die Zwangsvermischung der Schmelzen beim LS (s. Cu-Inseln in Ta) in Verbindung mit einer guten Benetzung Cu-flüssig/Ta-fest liefert dagegen ausgezeichnete Schweißverbindungen /7/.

b) Ni(Sn) – Ta

Ni benetzt das Ta schlecht. Infolge der guten Mischbarkeit kommt es im Nichtgleichgewichtsprozeß zur Ausbildung beträchtlicher spröder NiTa-Anteile. Die LS- und die WPW-Verbindungen (Halbwelbetrieb) erreichen nicht die Drahtfestigkeit.

c) Cu(Sn) – Ag

Gute Mischbarkeit im festen und flüssigen Zustand sichert gute Eignung für LS und WP.

d) Cu(Sn) – Al

Starke Wärmeableitung, Lunkenbildung, sprödes CuAl₂, Brückenbildung und eine geringe Grenzfläche bringen große Störanfälligkeit

² Abkürzung gemäß Tafel 2.

³ Tafel 3 enthält Zahlenangaben, wonach mit dem WPT-Verfahren am System Cu(Sn)-Al ausgezeichnete Verbindungsfestigkeiten im automatischen Schweißbetrieb erzielt werden.

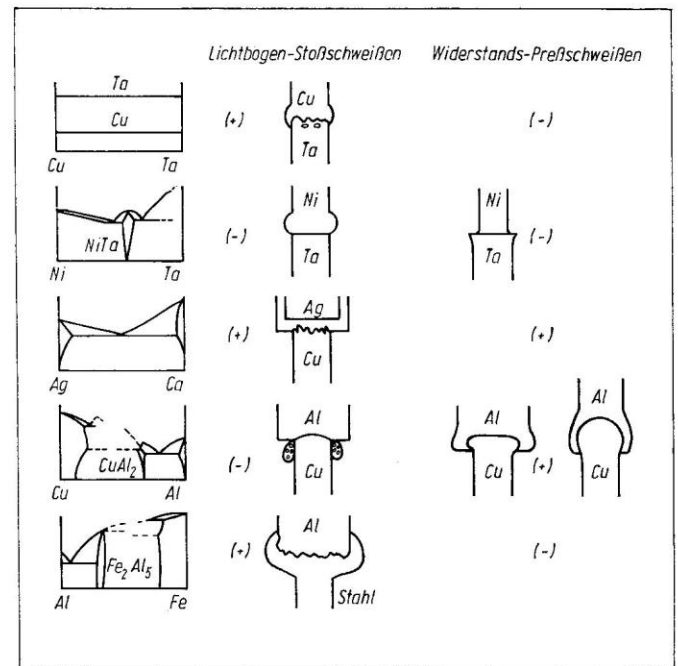


Bild 3. Qualitative Zustandsdiagramme und strukturelle Charakterisierung einiger Schweißverbindungen
(+) gute Schweißbarkeit bzw. Verbindungsfestigkeit
(-) schlechte Schweißbarkeit bzw. Verbindungsfestigkeit

und geringe Verbindungsfestigkeit beim LS (vgl. Abschnitt 4). Die Drahtfestigkeit beim WPI wird erreicht, da die Interdiffusion innerhalb der Impulsdauer von 20 bis 30 ms ausreicht, ohne daß die Inkubationsperiode für die CuAl₂-Bildung ($t_i \approx 20$ ms bei $T = 660$ °C /8/) wesentlich überschritten wird. Die große Berührungsfleche A_W des Wulstes ($A_W \approx 2 A_{Cu}$) trägt wesentlich zur Verbindungsfestigkeit bei.³ Beim WPW ist die Impulsdauer von 10 ms für die Diffusion zu kurz, um reproduzierbar die Drahtfestigkeit zu erreichen.

e) Stahl (Cu, Sn) – Al

Ausgezeichnete Festigkeiten werden beim LS trotz der Existenz spröder intermetallischer Verbindungen erzielt, weil durch gute Benetzung Stahl-flüssig/Al-fest und Zwangsvermischung der Schmelzen eine große Verbindungsfläche resultiert. Das WP ist auszuschließen, da der hohe Formänderungswiderstand des Stahls die Wulstbildung behindert /3/.

4. Zuverlässigkeitsbetrachtungen

Bei Anschlußdraht-Stumpfschweißverbindungen besteht ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen elektrischer und mechanischer Stabilität. Die Unterscheidung beider Anteile ist in jedem Fall ein meßtechnisches Problem und eine Festlegungsfrage bezüglich der Ausfallgrenzen. Die Bestimmung der Zuverlässigkeit geschieht bei gegebener Ausfallgrenze (z. B. $R = \infty$ und vollständiger mechanischer Lösung eines Anschlußdrahts je Kondensator) anhand der Lebensdauer, der Lebensdauerprüfmethode und des Einflusses der Umweltbedingungen auf die Lebensdauer. Die Prüfmethode liefert eine von ihr abhängige Festigkeitsverteilung. Deshalb ist z. B. die maximale Festigkeit kein gutes Maß der Lebensdauer.

Eigene Untersuchungen an etwa 35 000 Schweißverbindungen des Systems Cu(Sn)-Al zeigen, daß die zerstörenden Prüfverfahren a) Biegebelastung laut TGL /9/, b) axiale Belastung, c) Belastung mit um 90° unmittelbar oberhalb des Wulstes abgewinkeltem Draht, in dieser Reihenfolge verschärfte Ausfallbedingungen sind. Eine sorgfältige Vergleichsuntersuchung zeigte, daß für $d_{Cu} = 0,8$ mm und $d_{Al} = 2,0$ mm⁴ Schweißverbindungen mit einem 20-N-Ausfallpegel bei 90°-Belastung im Biegeversuch gerade noch nicht ausfallen, während der Bruch bei axialer Belastung erst oberhalb von 40 bis 50 N erfolgt. Beim optimierten Prozeß ist für die Fertigungsüberwachung als Stichproben-Kontrollgröße die Drahtfestigkeit bei 90°-Belastung anzustreben, sofern eine Festigkeitsverteilung im Vorversuch ermittelt worden ist, die bis auf einen nur wenige Prozent der Gesamtmenge enthaltenden Verteilungsschwanz mit der Drahtfestigkeitsverteilung übereinstimmt. Je höher der Schwanz-Anteil

ist, desto weiter ist der Prozeß vom Optimum entfernt. Das Verfahren ist im gegebenen Fall ungeeignet, wenn in der Verteilung ein Nebenmaximum mit erheblichem Anteil an der Gesamtmenge auftritt, und völlig indiskutabel, wenn obendrein die Festigkeit im Nebenmaximum unterhalb einer anwendungstechnisch akzeptablen Grenze liegt. Insofern sind die wichtigsten Eigenschaften einer Festigkeitsverteilung im Verteilungsschwanz enthalten. Das führt zu Schwierigkeiten bei der Ermittlung des Qualitätsniveaus von optimierten Schweißprozessen, da die Anzahl der im Schwanzbereich liegenden Meßpunkte — sie sind für dessen exakte Lokalisierung unbedingt erforderlich — mit steigendem Optimierungsgrad stark abnimmt. Ist die Anzahl der Ausfälle nur 1 je 100 bzw. sogar je 1 000, so sind sehr bald ökonomische Grenzen gesetzt.

Das Diagramm im Bild 4 zeigt experimentell ermittelte Verteilungen der Festigkeit von Schweißverbindungen zwischen 0,8 mm dicken Drähten (Cu, Stahl) und 2,0 mm dicken Al-Nieten bzw. -Formstiften. Wählt man einen Betrag von 100 N (untere experimentelle Drahtfestigkeit) als Ausfallgrenze, so folgt, daß das LS-Verfahren für das System Cu(Sn)-Al nicht geeignet ist.

5. Praktische Konsequenzen

In der Praxis sind bei der Festlegung des Schweißsystems, bestehend aus Stoffpaar, Fügezustand, Schweißverfahren, Schweißmaschine, Prüfkriterien und -verfahren, Produktivität und nicht zuletzt Bedien- und Betreuungspersonal, objektive und subjektive Grenzen gesetzt. Erfahrungsgemäß wird jedoch eine gute Lösung gefunden, wenn man sich auch innerhalb dieser Grenzen von vornherein einen durch quantitative und halbquantitative Untersuchungen wissenschaftlich begründeten Überblick über die möglichen Einflußgrößen verschafft, zu denen unbedingt zu zählen sind:

- Verfahrens- und Anlagenparameter (einschließlich der Verschleißteile — Tafel 3)
- Toleranzfelder der Werkstoffe, Werkzeuge, Anlagensysteme (einschließlich metallurgischer und verfahrensspezifischer Störfaktoren)
- Kontroll- und Steuergrößen (einschließlich Prüfkriterien und Mensch-Maschine-System)
- Anwendungsmerkmale und Verbindungszuverlässigkeit.

Optimierungskriterien finden sich aus Modellbetrachtungen zur Energie- und Stoffbilanz unter Einbeziehung der Stromkreis- und Steuerparameter.

Es bestehen vielfältige Möglichkeiten zur experimentellen Überprüfung. Ein nach den Erfahrungen des Verfassers ausgezeichnetes Meßinstrument ist ein Zweistrahl-Impulsspeicheroszillograf, mit dem die Schweißspannung und die Schweißstromstärke (Gleichtaktspannungen ausschließen!) zugleich geschrieben werden. Anhand der Diagramme können die wichtigsten elektrischen Parameter berechnet, das Preßkraftsystem überwacht, Störungen erkannt und Beziehungen zur Schweißstellenfestigkeit gefunden werden. Das Gerät läßt sich bei bestimmten Optimierungsaufgaben unmittelbar an Schweißmaschinen in der Produktion einsetzen, wodurch man sehr schnell einen Überblick über das Gesamtspektrum der positiven und negativen Einflußfaktoren gewinnt.

Tafel 3. Mittelwerte einiger Material- und Anlagenparameter für das Widerstandspreßschweißen mit Impuls (transformierte Kondensatorentladung) am System Cu(Sn)-Al/2/

Parameter		d_{Cu} in mm	
		0,6	0,8
d_{Al}	mm	2,5	2,5
l_{Cu}	mm	1,5	2,0
l_{Al}	mm	1,0	1,0
E_D	Ws	140	160
E_S	Ws	22	30
$U^{\circ}P$	V	340	440
$U_{S, max}$	mV	1,3	1,6
$I_{S, max}$	kA	1,3	1,9
$R^{\circ}S$	m Ω	1,0	5,0
$R^{\circ}S$	m Ω	0,8	0,6
$N_{S, max}$	kW	1,6	3,0
η°	%	16	18
τ	ms	30	20
F_V	N	70	55
F_N	N	85	40

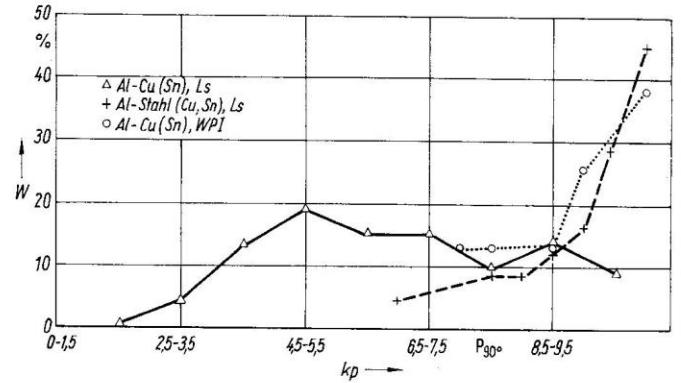


Bild 4. Prozentuale Verteilung der Zerreißfestigkeiten (90°-Belastungstest) von Schweißverbindungen, die nach unterschiedlichen Verfahren (Abkürzung gemäß Tafel 2) hergestellt wurden

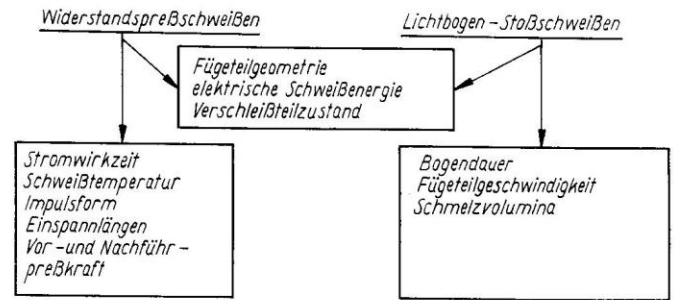


Bild 5. Wichtige Kontroll- und Steuergrößen bei Anschlußdraht-Stumpfschweißverfahren

Unabhängig vom speziellen Schweißproblem sind bei den diskutierten Anschlußdraht-Stumpfschweißverfahren, die im Bild 5 gezeigten Kontroll- und Steuergrößen ausschlaggebend.

Die größeren Vorteile, vor allem weniger Kompatibilitätseinschränkungen bezüglich Materialkombination und industrieller Kontamination, geringere Abhängigkeit vom Schweißwiderstand, geringerer Klemmbackenverschleiß, höhere Arbeitsgeschwindigkeit, liegen eindeutig beim Lichtbogen-Stoßschweißen. Das führte in den letzten Jahren in der Kondensatorindustrie zu einer Substitution von verzinneten Kupfer-Anschlußdrähten durch verkupferte und verzinnete Stahldrähte als Schweißpartner für Aluminium, da die Zuverlässigkeit LS-geschweißter Cu(Sn)-Al-Verbindungen unzureichend ist. Trotzdem sind auch die Möglichkeiten des Widerstandspreßschweißens längst nicht ausgeschöpft.

Die elektronische Überwachung der Schweißdaten jeder einzelnen Schweißung in der Massenfertigung mit automatischer Aussortierung bei Nichteinhaltung vorgegebener Toleranzen (z. B. /10/) ist ein unausweichlicher Entwicklungstrend, der in diesem Sinn neue Ansatzpunkte gibt.

Literatur

- [1] Langer, H.-D.: Grundlagen und Anwendung des Stumpfschweißens von Anschlußdrähten. Vortrag, Tagung Elkond 76, Warna 1976.
- [2] Langer, H.-D.: Stumpfschweißen von Anschlußdrähten, Bericht, VEB Kondensatorenwerk Freiberg 1976.
- [3] Kabanov, N. S., und Stepak, U. Sch.: Die Technologie des Widerstandsstumpfschweißens. Moskau: Verlag Masinstrojenie, 1970.
- [4] Slade, P. G.: Initial separation of electrical contacts carrying high currents. J. Appl. Phys. 42 (1971) 3290.
- [5] Hansen, M.: Konstitution binärer Legierungen. New York u. a.: McGraw-Hill. 1958.
- [6] Elliott, R. P.: Konstitution binärer Legierungen. Erste Ergänzung. McGraw-Hill, New York u. a. 1965.
- [7] Langer, H.-D., und Rothe, R.: Veröffentlichung in Vorbereitung.
- [8] Larikov, L. N.; Rjabov, V. R., und Falcenko, V. M.: Festkörperdiffusionsprozesse beim Schweißen. Moskau: Verlag Masinstrojenie, 1975.
- [9] TGL 32 377/02 — Bauelemente der Elektronik, Allgemeine technische Forderungen (1976).
- [10] Langer, H.-D.; Rothe, R., und Schuricht, K.: Überwachungs- und Steuerungseinrichtung für Widerstandsschweißmaschinen. DDR-Wirtschaftspatent Nr. 126322 (1977). SwA 10798