

# Lichtbogenhartlöten - Innovativ, sicher und wirtschaftlich

Norbert Knopp, Mündersbach und Robert Killing, Solingen

## Einleitung

Das Löten ist nach dem Schweißen und zusammen mit dem Kleben und dem mechanischen Fügen ein wichtiges Verfahren zum Verbinden metallischer Komponenten. Im Vergleich zum Schweißen wird beim Löten weniger Wärme in die Fügezone eingebracht, wodurch Oberflächenschichten, z.B. Zinküberzüge weniger geschädigt werden und der Verzug der Bauteile geringer ist. Neben dem konventionellen Weichlöten, daß als Schwalllöten, mit dem LötKolben oder der Flamme ausgeführt wird und dem Hartlöten mit der Flamme oder im Lötöfen, hat in den letzten Jahren mit dem zunehmenden Einsatz von Feinblechen mit metallischen Überzügen das Lichtbogenhartlöten einen festen Platz in der Fertigung eingenommen.

Das Lichtbogenhartlöten erstreckt sich über ein weites Feld, weil darunter eine ganze Familie von Lötverfahren zu verstehen ist, die teils mit abschmelzender Elektrode arbeiten, wie das MIG-/MAG-Löten, teils mit nichtabschmelzender Wolframelektrode, wie das WIG- und das Plasma-Löten. Der bisherige Einsatz des Verfahrens konzentriert sich allerdings mehr auf das Löten von Strukturen im Dünnpblech- oder Feinblechbereich, und zwar vornehmlich an solchen mit metallischen Überzügen.

Die vorliegende Broschüre will zeigen, worauf es dabei ankommt.

### 1 Definition Schweißen/Löten

Die Unterschiede zwischen dem Schmelzschweißen und dem Löten listet die Tabelle 1 auf. Während beim Schweißen Schweißgut und Grundwerkstoff in der Fügezone verflüssigt werden und die Vereinigung der Partner durch Erstarren des verflüssigten Werkstoffs erfolgt, wird beim Löten nur das Lot verflüssigt und die Bindung zum Grundwerkstoff erfolgt durch Adhäsionskräfte und Diffusion.

Aus den unterschiedlichen Bindungsmechanismen resultiert auch der niedrigere Energiebedarf beim Löten und die damit zusammenhängenden Vorteile wie die geringere Schädigung des Werkstoffes und der geringere Verzug. Das geringere Wärmeeinbringen hat noch weitere Vorteile, die in späteren Abschnitten behandelt werden.

### 2 Auf den Überzug kommt es an

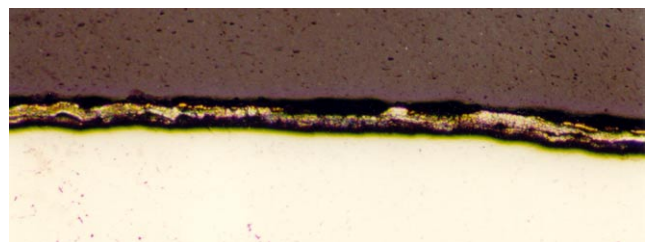
Zum Schutz vor Korrosion werden Stahlbleche und –

Profile häufig mit metallischen Überzügen beschichtet. Im Kfz-Karosseriebau, bei Haushaltsgeräten und in der Lüftungs- und Klimatechnik sind solche beschichteten Werkstoffe besonders häufig anzutreffen. Zinkschichten können auf verschiedene Weise aufgebracht werden. Feuerverzinkungen können im Durchlaufverfahren aufgebracht werden, man spricht von Bandverzinkung (Sendzimiervverzinkung), oder durch Tauchen in Zinkbäder. Letzteres nennt man Stückverzinken. Weiterhin gibt es noch das galvanische Verzinken und das Spritzverzinken durch thermisches Spritzen. Ferner werden durch Schmelztauchen oder Galvanisieren dünne Überzüge aus Aluminium, Zink-Aluminium, Zink-Nickel, Aluminium-Zink Aluminium-Silizium und Aluminium-Nickel auf Stahloberflächen aufgebracht.

Die Schichtdicken, die sich bei den verschiedenen Verfahren ergeben sind sehr unterschiedlich [1]. Die dicksten Schichten liegen nach dem Stückverzinken vor - etwa 80 Mikrometern. Es folgen mit abnehmender Dicke das Bandverzinken (etwa 20 Mikrometer) und die galvanisch aufgetragenen Schichten mit einigen Mikrometern Schichtdicke. Beim Feuerverzinken bilden sich zuerst auf dem Eisen verschiedene Eisen/Zink-Schichten, auf der sich oberflächenseitig eine Reinzinkschicht absetzt. Bild 1 zeigt eine galvanisch aufgetragene Zinkschicht auf einer Eisenoberfläche mit einer Dicke von 8 Mikrometern, Bild 2 eine Zinkschicht von etwa 80 Mikrometern, die beim Stückverzinken entstand.

Definition des Schmelzschweißens nach DIN 1910	Definition des Lötens nach DIN 8505
Schweißen ist das Vereinigen von Werkstoffen in der Schweißzone unter Anwendung von Wärme und/oder Kraft mit oder ohne Schweißzusatz. Es kann durch Schweißhilfsstoffe – z.B. Schutzgas, Schweißpulver oder Pasten - ermöglicht oder erleichtert werden. Die zum Schweißen notwendige Energie wird von außen zugeführt.	Löten ist ein Verfahren zum Verbinden metallischer Werkstoffe mit Hilfe eines geschmolzenen Zusatzwerkstoffes (Lotes), gegebenenfalls unter Anwendung von Flußmitteln. Die Schmelztemperatur des Lotes liegt unterhalb derjenigen der zu verbindenden Grundwerkstoffe. Diese werden benetzt ohne geschmolzen zu werden.
Schmelzschweißen ist Schweißen bei örtlich begrenztem Schmelzfluß mit oder ohne Schweißzusatz	

**Tabelle 1** Unterschiede zwischen Schmelzschweißen und Löten



**Bild 1** Galvanische Verzinkung – 8µm dick

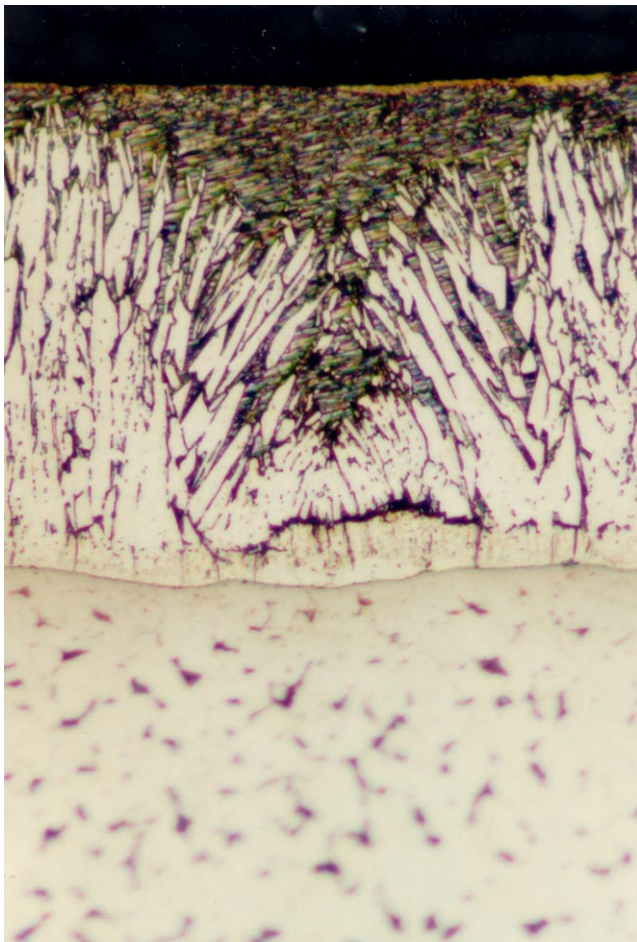


Bild 2 Stückverzinkung - 80µm dick

Mit der Dicke der Zinkschicht vergrößern sich auch die Schwierigkeiten, die beim Schweißen und Löten entstehen.

### 3 Probleme beim Schweißen von Werkstoffen mit verzinkten Oberflächen

Beim Überschweißen verzinkter Oberflächen können verschiedene Probleme auftreten, die sich mit zunehmender Zinkschichtdicke verstärken [2].

#### 3.1 Rißbildung

Durch Aufmischen von Zink ins Schweißgut kann es zu Zinkablagerungen an den Korngrenzen und damit unter Einfluß von Eigenspannungen zu lötluchartigen Rissen in der Schweißnaht kommen. Das zur Rißbildung erforderliche Spannungsniveau ist aber nur bei höherfesten Stählen und größeren Blechdicken zu erwarten, sodaß Rißbildung im Dünoblechbereich beim Schweißen keine wesentliche Bedeutung hat.

#### 3.2 Porenbildung

Wegen des niedrigen Siedepunktes von Zink (907° C) kommt es unter Einfluß der Schweißwärme zur Verdampfung von Zink. Wenn dies nur an der Oberfläche geschieht, kann der entstehende Zinkdampf als Rauch entweichen. Liegt dagegen das Zink in engen Spalten vor, wie bei Kehl- oder Überlappnähten, dann ist das Entweichen der entstehenden Zinkdämpfe behindert und es baut sich ein Druck im Schweißspalt auf, der, wenn er hoch genug gewor-

den ist, sich durch Blasenbildung im Schweißgut abbaut. Der Mechanismus dieser mechanischen Porenbildung ist in Bild 3 dargestellt. Auf diese Weise kommt es zur Bildung von meist schlauchförmigen Porenketten im Schweißgut.

Das Problem der mechanischen Porenbildung nimmt ab mit geringer werdenden Dicke der Fügepartner, weil in dünnen Blechen sehr dichte Spalte eher unwahrscheinlich sind und bei diesen auch die Erstarrung langsamer erfolgt, sodaß die Entgasung verbessert wird. Trotzdem sollte man beim Schweißen oberflächenbeschichteter Werkstoffe nach Möglichkeit Fugenformen ohne Spalte bevorzugen. Porenbildung kann aber auch entstehen, wenn Zinkdämpfe durch überlaufendes Schweißgut eingeschlossen werden.

#### 3.3 Verschlechterung der Schweißseigenschaften

In den Lichtbogenbereich eindringende Zinkdämpfe verschlechtern wegen der großen Affinität von Zink zu Sauerstoff auch die Schweißseigenschaften des Lichtbogenprozesses. Durch Abbinden des freien Sauerstoffs kommt es zu einer Erhöhung der Oberflächenspannung am sich bildenden Tropfen und somit zu einem groben Werkstoffübergang verbunden mit verstärkter Spritzerbildung. Dies trifft auf das Lichtbogenhandschweißen mit Stabelektroden zu, besonders aber auf das MAG-Schweißen. Hier führt das stärkere Spritzen auch dazu, daß die Schutzgasdüse öfter gereinigt werden muß. Da auch die Viskosität des Schweißgutes zunimmt, muß die Schweißgeschwindigkeit meist reduziert werden.

#### 3.4 Starke Rauchentwicklung

Durch verdampfendes und verbrennendes Zink erhöht sich die Rauchentwicklung beim Schweißen, sodaß die zulässigen MAK- Werte (Maximale Arbeitsplatz-Konzentration) für Zinkoxid und für Stäube in der Regel überschritten werden. Es ist dann eine Absaugung der Schweißrauche am Entstehungsort erforderlich.

#### 3.5 Verbrennen der Zinkschicht

Neben der Naht wird die schützende Zinkschicht beim Schweißen teilweise zerstört. Das gleiche gilt bei dünneren Blechen für die Rückseite der Verbindung. Sofern diese Bereiche nur sehr schmal sind – kleiner als 2-3 mm – müssen sie nicht unbedingt ausgebessert werden, weil das umliegende unedlere Zink das Eisen katodisch schützt. Sind aber breitere Zonen geschädigt, dann müssen diese, wie die Schweißnaht selbst, z.B. durch Auftragen von An-

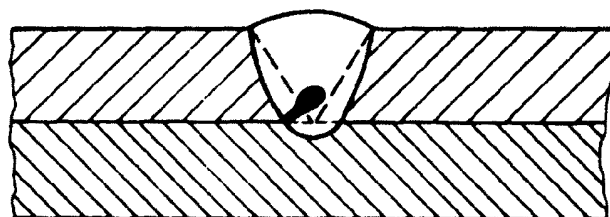
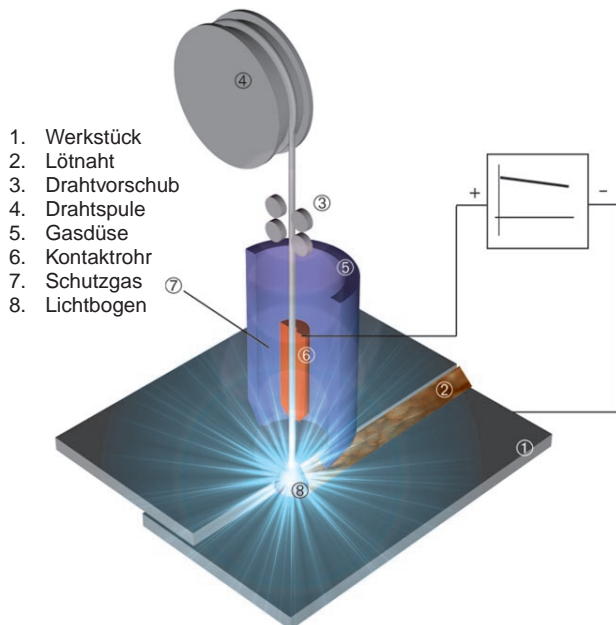


Bild 3 Prinzip der mechanischen Porenbildung



**Bild 5 Schematische Darstellung des MSG-Lötens nach [3]**

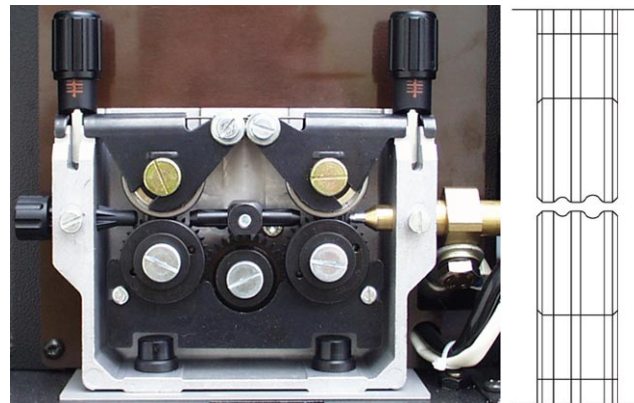
strichstoffen, Auftragen von Lötsschichten oder durch thermisches Spritzen wieder neu beschichtet werden. Die hier für das Schweißen verzinkter Strukturen beschriebenen Schwierigkeiten sind beim Lichtbogenhartlöten wegen des geringeren Schmelzpunktes des Lotes und des geringeren Wärmeeinbringens viel weniger ausgeprägt. Bevor aber auf die Vorteile des Lötens eingegangen wird, sollen im Folgenden zuerst die Verfahren des Lichtbogenhartlötens und die dabei verwendeten Lote näher beschrieben werden.

#### 4 Verfahren des Lichtbogenhartlötens

Grundlagen, Verfahren und Anlagen zum Lichtbogenhartlöten sind ausführlich im DVS-Merkblatt 0938, Teil 1 [3] beschrieben, ein Blatt 2, das Anwendungshinweise enthält, ist in Vorbereitung. Die Verfahren können danach in Metallschutzgas (MSG)- und Wolframschutzgas (WSG)-Lötprozesse unterteilt werden. Grundsätzlich ist das Prinzip der Prozesse ähnlich wie bei den entsprechenden Schweißprozessen, jedoch wird ein Zusatzwerkstoff (Lot) eingesetzt, dessen Schmelzbereich niedriger ist, als der des Grundwerkstoffes. Ferner ist die Technik des Lötens etwas anders und der Prozess erfordert andere Einstellparameter.

#### 5 Prinzip und Anlagen zum MIG/MAG-Löten

Bild 5 zeigt das Prinzip des MIG/MAG-Lötens. Das Lot wird von den Vorschubrollen der Vorschubeinheit von der Spule abgezogen und über ein Schlauchpaket dem Brenner zugeführt. Das Schlauchpaket sollte bei nur geschobenem Draht nicht länger als 3 m sein. Hervorragend sind Push/Pull-Antriebe geeignet, bei denen die Drahtelektrode geschoben und gezogen wird. Optimale Fördereigenschaften erhält man auch mit einem 4-Rollen-Antrieb (Bild 4). Die Drahtführungsschläuche sollten wegen des geringen Gleitwiderstandes aus Kunststoff sein. Bei Dauerbetrieb sind wassergekühlte Brenner empfehlenswert.



**Bild 4 Vier-Rollen-Antrieb**

Als Schutzgase werden sowohl inerte Gase (MIG-Löten) als auch inerte Gase mit geringen Anteilen von aktiven Gasen eingesetzt (MAG-Löten).

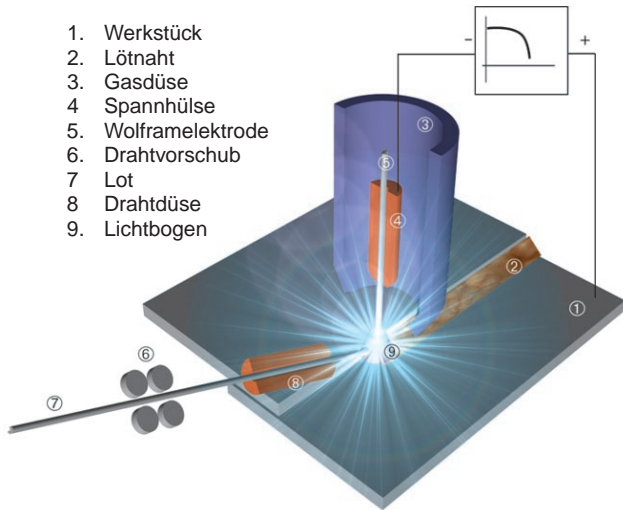
Für das Löten kommen Gleichstromquellen mit Konstantspannungscharakteristik zum Einsatz. Für das Arbeiten im Kurzlichtbogenbereich können konventionelle Stromquellen verwendet werden. Wenn mit dem Impulslichtbogen gelötet wird, sind elektronische Stromquellen (Bild 6) vorzuziehen. Wegen der geringen elektrischen Leistung, mit der in der Regel gelötet wird, müssen die Stromquellen vor allem im unteren Bereich exakt einstellbar sein und sollten ein schnelles Regelverhalten aufweisen.

#### 6 Prinzip und Anlagen zum WIG-Löten

Wie beim WIG-Schweißen brennt der Lichtbogen bei diesem Verfahren zwischen einer nichtabschmelzenden Wolframelektrode und dem Werkstück. Als Schutzgase kommen inerte Gase zum Einsatz. Das WIG-Löten kann, mit von Hand zugegebenen Lötstäben manuell ausgeführt werden oder teilmechanisiert, wobei der Lötendraht von einem separaten Vorschubwerk zugegeben wird (Bild 7). Die Stromquellen haben fallende Charakteristik und sollten vor allem im unteren Bereich fein einstellbar sein. Es wird mit gleichförmigen Gleichstrom geschweißt.



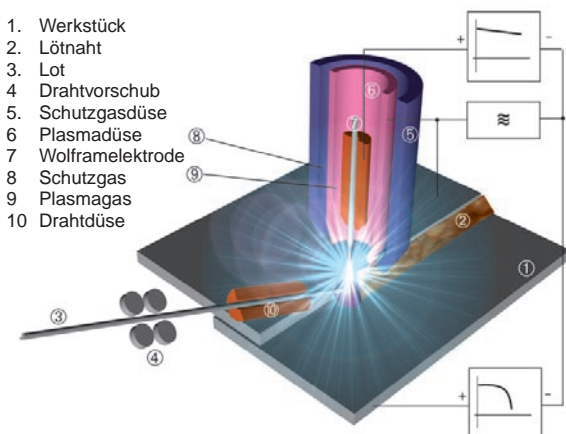
**Bild 6 Inverterstromquellen zum MIG/MAG-Löten**



**Bild 7** Schematische Darstellung des WIG-Lötens nach [3]

### 7 Prinzip und Anlagen zum Plasma-Löten

Das Plasma-Löten kann mit gleichförmigen und mit impulsförmigem Strom ausgeführt werden. Die Stromquellen haben fallende Charakteristik, das Prinzip des Prozesses zeigt Bild 8. Durch die Einschnürung des Lichtbogens durch eine wassergekühlte Kupferdüse ist seine Energiedichte erhöht. Es sind zwei Schutzgasströme notwendig, nämlich für das Plasmagas und für das Schutzgas. Der Lötzusatz wird mechanisiert zugegeben. Wie beim WIG-Löten ist die Energiezufuhr unabhängig von der Menge des abgesetzten Lötgutes. Zur Erhöhung der Abschmelzleistung und Schweißgeschwindigkeit kann der Zusatzwerkstoff auch durch Anschließen an eine separate Stromquelle durch Widerstandserwärmung vorgewärmt werden (Plasma-Heißdraht-Löten). Da die Wolframelektrode weit zurückstehend im Brenner sitzt, ist die Anlage mit einem Hochspannungsimpuls-Zündhilfen ausgestattet. Diese zündet zuerst einen nichtübertragenden Hilfslichtbogen der zwischen Elektrode und der Einschnürdüse brennt. Dieser ionisiert die spätere Lichtbogenstrecke vor, sodaß der übertragende Lichtbogen danach berührungslos ohne Hochspannungszündimpuls zünden kann.



**Bild 8** Schematische Darstellung des Plasmalötens nach [3]

### 8 Andere Verfahren zum Lichtbogenhartlöten

Neben den bisher genannten Verfahren kann auch das Plasma-MIG-Löten eingesetzt werden, bei dem ein WIG- und ein MIG-Lichtbogen kombiniert werden. Durch getrennte Einstellung der beiden Lichtbögen dieses Hybrid-Verfahrens, können besondere Effekte erzielt werden.

### 9 Lötzusätze

Zum Lichtbogenhartlöten kommen in der Regel Kupferbasis-Legierungen (Bronzen) zum Einsatz. Die wichtigsten Legierungen sind in Tabelle 2 aufgelistet. Für verzinkte Bleche wird am meisten die Siliziumbronze SG-CuSi3 eingesetzt. Für aluminisierte Bleche eignet sich besser die Aluminiumbronze. Die Tabelle enthält auch die Schmelzbereiche der Legierungen. Sie liegen nicht wesentlich über 1000 °C und damit wesentlich niedriger als der Schmelzbereich des Grundwerkstoffes.

Neuerdings gibt es auch schon einige Sonderlegierungen zum Lichtbogenhartlöten z.B. Zinnbronzen mit höherem Sn-Gehalt (10 %) oder Siliziumbronzen mit erhöhtem Mn-Gehalt. Bei den Aluminiumbronzen kommen auch Zusätze von Nickel vor.

Die Lötzusätze werden in den Durchmessern von 0,8 bis 1,2 mm angeboten. Der am meisten verwendete Löt drahtdurchmesser ist 1,0 mm.

### 10 Schutzgase

Während bei den Wolfram-Lötverfahren schon wegen der Standzeit der Wolframelektrode als Schutzgas und auch als Plasmagas nur inerte Gase, meist Argon eingesetzt werden, bringt beim MSG-Löten die Verwendung von Argon mit geringen Anteilen von aktiven Bestandteilen gewisse Vorteile gegenüber Reinargon.

So bringt nach eigenen Versuchen beim Löt draht SG-CuSi3 die Zugabe von 2,5 % CO<sub>2</sub> oder 1 % O<sub>2</sub> eine bessere Stabilität des Lichtbogens, eine geringere Porosität und ein besseres Fließverhalten des Lotes. Das Wärmeeinbringen wird etwas erhöht. Das beste optische Aussehen der Löt naht und ein besonders gutes Lichtbogenverhalten wurde mit Argon + 2 % N<sub>2</sub> erreicht. Allerdings war die Porenbildung etwas größer.

Wie sich die verschiedenen Schutzgase bei anderen Lötwerkstoffen auswirken zeigt die Tabelle 3.

Sorte	DIN-Kurzzeichen	Legierungsbasis	Schmelzbereich °C
<b>Siliziumbronze</b>	SG-CuSi3	Cu + 3% Silizium	910-1025
<b>Zinnbronze</b>	SG-CuSn6	Cu + 6% Zinn	910-1040
<b>Aluminiumbronze</b>	SG-CuAl8	Cu + 8% Aluminium	1030-1040

**Tabelle 2** Die wichtigsten Lötwerkstoffe zum Lichtbogenhartlöten

Draht	Schutzgas	Lichtbogenverhalten / Spritzer	Porosität	Wärmeeintrag	Nahtaussehen	Fließverhalten
SG-CuSi3	Argon	+	o	++	+	o
	99%Ar, 1%O <sub>2</sub>	++	+	o	++	++
	97,5%Ar, 2,5%CO <sub>2</sub>	++	+	o	+	++
	98%Ar, 2%N <sub>2</sub>	++	--	o	++	++
	98%Ar, 2%H <sub>2</sub>	+	--	o	+	o
	70%Ar, 30%He	+	+	+	+	o
	SG-CuAl8	Argon	+	+	++	+
99%Ar, 1%O <sub>2</sub>		+	+	o	+	+
97,5%Ar, 2,5%CO <sub>2</sub>		+	+	o	+	+
98%Ar, 2%N <sub>2</sub>		--	+	-	-	o
98%Ar, 2%H <sub>2</sub>		--	-	-	o	o
70%Ar, 30%He		++	+	++	++	++
SG-CuSn10	Argon	++	o	++	+	+
	99%Ar, 1%O <sub>2</sub>	++	+	o	++	++
	97,5%Ar, 2,5%CO <sub>2</sub>	+	+	o	++	++
	98%Ar, 2%N <sub>2</sub>	++	--	o	--	++
	98%Ar, 2%H <sub>2</sub>	--	--	--	--	--
	70%Ar, 30%He	+	o	+	+	+

Tabelle 3 Einfluß der Schutzgase beim MSG-Löten

### 11 Werkstückvorbereitung

Wegen der geringen Blechdicken, bei denen es hier geht, ist eine mechanische Bearbeitung der Fugenkanten meist nicht erforderlich. Es kommen I-Stöße, Kehlnähte am T- und Überlappstoß, Stirnflächennähte und Bördelnähte vor (Bild 9).

Um eine gute Benetzung zwischen Lot und Grundwerkstoff zu gewährleisten, sollte der Fügebereich metallisch blank und frei von Verunreinigungen sein.

### 12 Durchführung des Lichtbogenhartlötens

#### 12.1 MSG-Löten

Beim MSG-Löten ist die Brennerstellung leicht stehend (10-20 °). Dadurch kommt es durch die vorlaufende Wärme und den Lichtbogen zu einer teilweisen Verdampfung der Beschichtung schon vor dem

Bezeichnung	Skizze	Grenzsplattweite [mm]
I-Naht am Stumpfstoß		$0 < S < 2 t_{min}$
Kehlnaht am T-Stoß		$0 < S < 2 t_{min}$
Kehlnaht am Überlappstoß		$0 < S < 2 t_{min}$
Kehlnaht am abgesetzten Überlappstoß		$0 < S < 2 t_{min}$
Kehlnaht am Überlappstoß (3-Blech-Verbindung)		$0 < S < 2 t_{min}$
Stirnflächennaht		$0 < S < 2 t_{min}$
Bördelnäht		$0 < S < 2 t_{min}$

Bild 9 Nahtarten und Spaltbreiten beim MSG-Löten

Brenner und die aufsteigenden Dämpfe gelangen nicht in den Lichtbogenbereich. Dadurch wird die Lichtbogenstabilität nicht verringert und die Schutzgasdüse verschmutzt weniger. Die eingangs beim Schweißen beschriebenen negativen Einflüsse der Zinkschicht treten also nicht auf, bzw. sind zumindest stark reduziert. Der Lichtbogen bewirkt auch eine Reinigung der Bindeebene. Flußmittel sind deshalb beim Lichtbogenhartlöten in der Regel nicht erforderlich.

Verschiedentlich wird empfohlen, auf einer Zunge von vorlaufendem Lotwerkstoff zu löten, sodaß der Lichtbogen nicht direkt auf dem Grundwerkstoff brennt [1]. Dabei verbrennt zwar weniger Zink, es wird aber ein Einbrand und damit die Aufmischung von Eisen ins Lot verhindert. Eisen ist in Kupferwerkstoffen nur in geringen Mengen löslich. Die über die Löslichkeitsgrenze hinaus aufgenommenen Eisenanteile liegen in Form von rundlichen Fremdeinschlüssen in der Lötnaht vor, und verschlechtern die mechanischen Eigenschaften der Verbindung.

Die Befürchtung, daß es durch dieses vorlaufende Lötgut zu Bindefehlern kommen könnte, ist bei richtiger Anwendung unbegründet, da die Bindung beim Löten nicht durch Anschmelzen erfolgen soll. Die Schmelztemperatur des Lotes genügt, um die Zinkschicht, die sich noch auf der Oberfläche befindet, zu schmelzen (419 °C), so daß diese eine Legierung mit dem Lot eingehen kann. Es entsteht als Zwischenschicht eine Art Sondermessing, womit eine stoffschlüssige Verbindung hergestellt ist. Auch erfolgt eine Diffusion von Kupfer in den Grundwerkstoff, wodurch die Bindung verstärkt wird.

Beim Lichtbogenhartlöten soll wenig Wärme eingebracht werden. Einerseits schützt dies die metallische Beschichtung vor zu großer Zerstörung und reduziert den Verzug der üblicherweise dünnen Fügepartner, andererseits ist eine große Wärmeeinbringung wegen des niedrigen Schmelzbereichs des

Blechdicke [mm]	1	1,5	2	3
Lichtbogenspannung [V]	14,0	14,3	14,5	17
Schweißstromstärke [A]	55	72	90	118
Drahtvorschub [m/min]	2,3	3,4	4,5	6,0

Schutzgas: Argon – 12 l/min; Lötendraht: SG-CuSi3 – 1,0 mm dick; Grundwerkstoff: W.-Nr. 1.0312; Lötposition: PA, PB; Brenneranstellung: 10-20° stechend; Lötgeschwindigkeit: 50-70 cm/min; Nahtart: Kehlnaht am Überlappstoß.

**Tabelle 4: Richtwerte für das MIG-Löten im Kurzlichtbogenbereich; Werte nach [3]**

Lotes auch gar nicht erforderlich. Das MSG-Löten kann deshalb im Kurzlichtbogenbereich erfolgen oder im unteren Leistungsbereichs des Impulslichtbogens. Je nach Blechdicke liegen die Stromstärken etwa zwischen 50 und 120 Ampere, beim Impulslöten auch etwas niedriger. Tabelle 6 und Tabelle 4 enthalten Richtwerte für das Einstellen der Anlagen. In modernen MSG-Anlagen können vom Hersteller vorprogrammierte Kennlinien für das Löten aufgerufen werden.

### 12.2 WSG-Löten

Auch beim WSG-Löten wird mit geringer Energie gelötet, im Gegensatz zum MSG-Löten wird der Brenner aber schleppend geführt. Dabei soll der Lichtbogen mehr auf das Schmelzbad gerichtet sein. Auf diese Weise wird die Zinkschicht zwar nicht durch den Lichtbogen direkt verbrannt, aber die vorlaufende Wärme bewirkt auch hier einen teilweisen Abbrand der Beschichtung. Bei dieser Technik ist aber die Gefahr des Aufschmelzen von Grundwerkstoffes geringer. Beim mechanisierten Löten besteht sogar die Möglichkeit, durch entsprechende Einstellung des Drahtvorschubes da den Lötendraht etwas unter den Lichtbogen zu stellen, sodaß der Lichtbogen teilweise auf dem schmelzenden Drahtende brennt. Damit wird die Gefahr der Eisenaufnahme weiter reduziert.

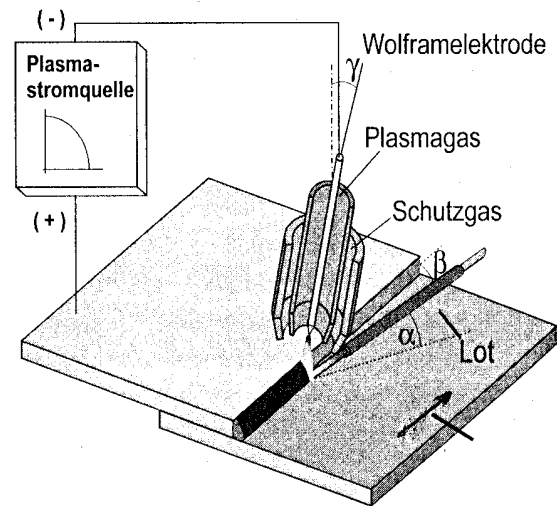
Unterschiedliche Auffassungen bestehen offenbar noch über die günstigste Art der Zuführung des Lötendrahtes. Während in den Prinzipskizzen aus Dem DVS-Merkblatt 0938-1 in Bild 7 und Bild 8 der Draht in Lötichtung stechend angeordnet ist, wird in [4] von guten Erfahrungen bei einer in Lötichtung schlep-

Blechdicke [mm]	1	1,5	2	3
Lichtbogenspannung [V] *)	16,0	17,0	18,0	19,0
Schweißstromstärke [A] *)	25	45	65	90
Impulsfrequenz [Hz]	20	35	60	80
Impulsdauer [ms]	1,5	1,6	1,7	1,7
Drahtvorschub [m/min]	2,0	3,0	4,5	6,0

\*) Effektivwerte

Schutzgas: Argon – 12 l/min; Lötendraht: SG-CuSi3 – 1,0 mm dick; Grundwerkstoff: W.-Nr. 1.0312; Lötposition: PA, PB; Brenneranstellung: 10-20° stechend; Lötgeschwindigkeit: 50-70 cm/min; Nahtart: Kehlnaht am Überlappstoß

**Tabelle 5: Richtwerte für das MIG-Löten mit dem Impulslichtbogen; Werte nach [3]**



**Bild 10 Brennerneigungs- und Drahtzuführungswinkel nach [4]**

penden Zuführung berichtet, (Bild 10).

Blechdicke [mm]	1	1,5	2	3
Lichtbogenspannung [V]	24	26	30	32
Impulsstromstärke: [A]	80	100	110	120
Grundstromstärke [A]	38	50	55	60
Impulsfrequenz [Hz]	2,5 – 3,0			
Drahtvorschub [m/min]	4,0	6,5	8,5	11

Schutzgas: Argon – 12 l/min; Plasmagas: Argon – 0,9 l/min; Lötendraht: SG-CuSi3 – 1,0 mm dick; Grundwerkstoff: W.-Nr. 1.0312; Lötposition: PA, PB; Brennerstellung: neutral; Lötendrahtzuführung: in Lötichtung stechend; Lötgeschwindigkeit: 50-70 cm/min; Nahtart: Kehlnaht am Überlappstoß

**Tabelle 6: Richtwerte für das Plasmalöten mit gepulstem Lichtbogen; Werte interpoliert nach [3]**

Richtwerte für das Einstellen der Plasmaanlage sind in der Tabelle 6 enthalten.

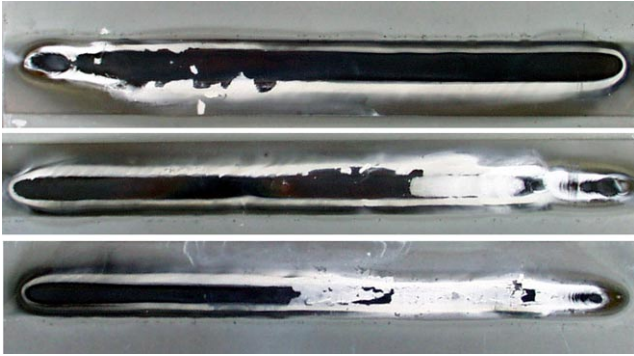
### 13 Ergebnisse von Lötversuchen

Bild 11 zeigt die Ober- und Unterseiten einer Lötverbindung an verzinkten Karosserieblechen mit einer Dicke von 1 mm und im Vergleich dazu in Bild 12 die Unterseiten von MAG-Schweißungen an solchen Blechen.

Man erkennt, daß wegen der niedrigeren Schmelzbadtemperatur beim Löten die Zinkschicht auf der Rückseite nur etwas oxidiert aber nicht verbrannt ist. Auf der Oberseite ist nur eine sehr schmale Zone zu erkennen, in der eine Schädigung aufgetreten sein könnte. Wegen der katodischen Schutzwirkung des Zinks braucht diese aber nicht ausgebessert werden, wenn sie schmaler als etwa 2 mm ist. Ein Teil des



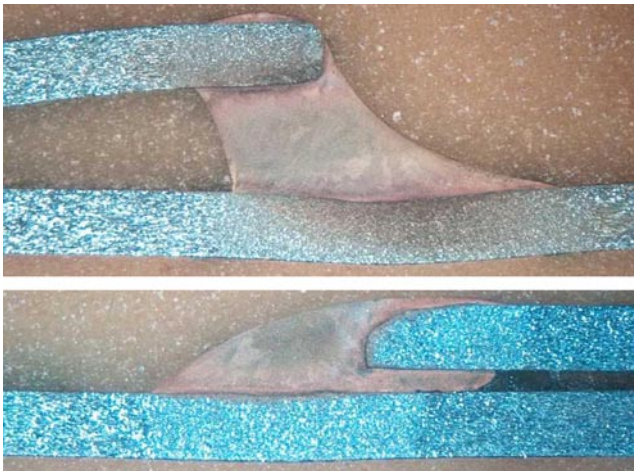
**Bild 11 Ober- und Unterseite einer MSG - Lötung an Karosserieblechen**



**Bild 12** Unterseite einer MSG - Schweißung an Karosserieblechen

flüssig gewordenen Zinks auf der Oberfläche fließt hinter dem Lichtbogen auch wieder zurück und lagert sich am Rand der Lötnaht mit der Bronze. Die Naht selbst ist von ihrer Legierung her korrosionsbeständig. Eine Nachbeschichtung wie beim Schweißen ist deshalb nicht notwendig.

Bild 15 zeigt Querschliffe von MSG-gelöteten Kehlnahtverbindungen am Überlappstoß. Obwohl die Kapillarwirkung des Lotes beim Lichtbogenhartlöten nicht so groß ist wie beim autogenen Hartlöten, ist das Lot doch ausreichend tief in den Lötspalt eingedrungen. Die Spaltüberbrückbarkeit ist gut. Eine geringfügige Vermischung mit dem Grundwerkstoff ist nur im unteren Teilbild festzustellen.



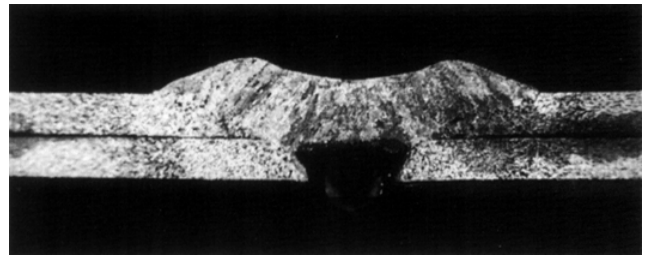
**Bild 15** Querschliffe von MSG-Lötverbindungen an Karosserieblechen ( $s=0,8\text{mm}$ ) mit unterschiedlichen Spaltbreiten

Bild 14 zeigt gegenüberstellend eine Lochpunktschweißung und eine Lochpunktlötung an Karosserieblechen. Die Lötnaht läßt wegen der größeren Bindefläche am Unterblech eine bessere Haltbarkeit erwarten als die Schweißnaht.

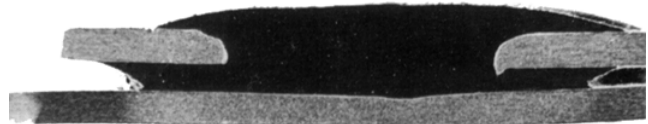
## 14 Fehler beim Lichtbogenhartlöten

### 14.1 Poren

Da die Schmelzbereiche der Lote, die für das Lichtbogenhartlöten zum Einsatz kommen, nur unwesentlich über dem Siedepunkt von Zink liegen, ist die Zinkverdampfung und damit die Porenbildung beim Löten sehr gering. Eine gewisse innere Porosität der Lötnahte kann toleriert werden, wenn die mechani-



MAG-Lochpunktschweißung mit G3Si1



MSG-Lochpunktlötung mit SGCuSi3

**Bild 14** Vergleich Lochpunktschweißung/Lochpunktlötung an Karosserieblechen

schen Eigenschaften der Verbindung dadurch nicht unzulässig beeinflusst werden.

### 14.2 Risse

Wegen der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Lot und Grundwerkstoff können Querrisse in den Lötverbindungen auftreten. Diese Rißbildung wird verstärkt, wenn kaltverformte, unter Zugspannungen stehende Strukturen gelötet werden. Die Lötnahte sollten deshalb nicht wesentlich länger als 50 mm ausgeführt werden. Längere Nähte können dann durch Aneinanderreihen mehrerer kurzer Nähte in Pilgerschrittfolge entstehen.

## 15 Haltbarkeit der Verbindungen

Es wird erwartet, daß die Festigkeit der Lötverbindungen mindestens die der verarbeiteten Grundwerkstoffe erreicht. Bei eigenen Versuchen wurden Kehlnähte am Überlappstoß an Karosserieblechen (1mm dick) geprüft. Alle Scherzugproben rissen im Grundwerkstoff, Bild 13, wobei auf den Blechquerschnitt bezogen Festigkeitswerte von durchschnittlich  $330\text{ N/mm}^2$  gemessen wurden. Solche Werte sind nicht verwunderlich, weil durch das teilweise Eindringen des Lotes in den Lötspalt, die tatsächlich tragende Fläche vergrößert wird. Bei höherfesten Stählen (Streckgrenzen  $>260\text{ N/mm}^2$ ) und bei dickeren Blechen ( $> \text{etwa } 1,5\text{ mm}$ ) ist dieses Verhalten nicht mehr zu erwarten. In diesem Falle muß durch Vorversuche geklärt werden, ob die Haltbarkeit für den vorgesehenen Zweck ausreicht. Dies ist nicht erforderlich, wenn eines der Bleche eine geringere Streckgrenze hat oder dünner ist.

Versuche an Lochpunktschweißungen und Lochpunktlötungen, wie sie in Bild 14 dargestellt wurden, zeigten, wie schon die Bindeflächen erwarten ließen, einen Vorteil der Lötverbindungen. Hier rissen alle Proben im Grundwerkstoff, während die Schweißpunkte aus dem Grundwerkstoff bei geringerer Belastung ausknöpften. Für höherfestere Stähle und dickere Bleche gilt auch hier das vorher Gesagte.



**Bild 13** Festigkeit der Lötverbindungen



**Bild 16** Lötnähte am hinteren Kotflügel eines PKW

## 16 Anwendungsbeispiele

Das Lichtbogenhartlöten hat vor allem im Kfz-Karosseriebau eine große Bedeutung erlangt. Schon in den 70iger Jahren gab es am VW-Käfer kurze Lötnähte, die damals aber noch mittels der Autogenflamme eingebracht wurden. Schon vor der Einführung des Lichtbogenhartlötens in die Automobilindustrie „schweißten“ Hersteller von Garagentoren aus verzinkten Werkstoffen, diese mit Bronzedrähten nach dem MIG-Verfahren. Von MIG-Löten war damals noch nicht die Rede.

Heute gibt es bei allen Automobilherstellern Anwendungsfälle für das Lichtbogenhartlöten, wobei teilweise das MSG-Löten, aber auch das Plasma-Löten eingesetzt wird. Meist handelt es sich um kurze Nähte an der Karosserie, die entweder manuell oder mit Hilfe von Industrierobotern gelötet werden. Bild 16 zeigt solche MSG-Lötnähte am hinteren Kotflügel eines PKW.

## 17 Schrifttum

[1] Killing, R.: MIG-Löten für den Dünnpblechbereich, Metallbau Heft 9/1999, S. 52 – 54 Callwey-Verlag, München

[2] Killing, R.: Mit dem Überzug leben, Metallbau Heft 5/1997, S. 32 – 35 Callwey-Verlag, München

[3] DVS-Merkblatt 0938-1 Lichtbogenlöten - Grundlagen, Verfahren, Anforderungen an die Anlagentechnik – DVS-Verlag Düsseldorf September 2001

[4] B. Bouaifi, B. Quaiassa, J. Tuchtfield, Ait-Mekideche und C. Radscheid: Plasmalöten von verzinkten Blechen – Stand und Entwicklungstendenzen im Karosseriebau, DVS-Berichte Band 204, DVS-Verlag Düsseldorf 1999