

# Aluminium-Hartlöten durch Induktion

## Aluminium brazing by induction heating

Spezielle Induktionsanlagen ermöglichen das Hartlöten von Aluminiumteilen mit hoher Zuverlässigkeit und Wiederholbarkeit. Der folgende Bericht beschreibt die Auslegung dieser Induktionsanlagen, welche auch das Weichlöten von Kupfer oder, mit speziellen Loten, die Verbindung von Aluminium- und Kupferteilen zulässt.

Special units for induction heating enables the brazing of aluminium parts with high reliability and repeatability. The following report describes that the special nature of these induction units enables also the soldering of copper or, with special solder, the realisation of the connection of aluminium and copper parts.

**B. Sc. Branko Petric**  
Induktio Ltd., Teslova  
(Slowenia)  
Phone:  
+386 (01) / 4776624  
Email: info@induktio.com



### Aluminium-Hartlöttechnologie

Bisherige Aluminium-Hartlötprozesse waren aufgrund der besonderen Eigenschaft von Aluminium sehr problematisch. Beim Erwärmen an Luft bildet sich auf der Oberfläche des Materials sofort eine dünne Oxidschicht (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Diese Oxidschicht verhindert eine Benetzung der Teile durch das Lot. Dieses Problem kann durch den Einsatz geeigneter Flussmittel gelöst werden, welche bei höheren Temperaturen die Bildung einer Oxidschicht verhindern.

Das zweite Problem wird dadurch verursacht, dass die Temperaturen beim Hartlöten nahe am Schmelzpunkt des Aluminiums liegen. Aluminium wird bei diesen Temperaturen sehr weich und kann keine mechanische Belastung / Spannung vertragen. Das bedeutet, dass es notwendig ist, eine sehr präzise Temperaturregelung während des Aluminium-Hartlötprozesses zu realisieren.



**Bild 1:** 10 kW Induktionserwärmungsumrichter  
**Fig. 1:** 10 kW induction heating converter

Bis jetzt gab es generell nur drei Arten für das Hartlöten von Aluminiumteilen. Diese sind das Erwärmen in einem normalen Kammerofen oder das Erwärmen durch eine offene Gasflamme. Die Temperatur in Kammer- und Banddurchlauföfen ist relativ gut zu kontrollieren. Jedoch ist die Regulierung der Temperatur beim Flammlöten ziemlich kompliziert.

Beim Löten in einem Ofen kann unter Schutzgasatmosphäre gearbeitet werden. Die Lötqualität und Reproduzierbarkeit ist aufgrund der sehr guten Temperaturregelung und der sehr gleichmäßigen Erwärmung ausgezeichnet. Nachteil ist der hohe Energieaufwand, da immer das gesamte Teil erwärmt werden muss.

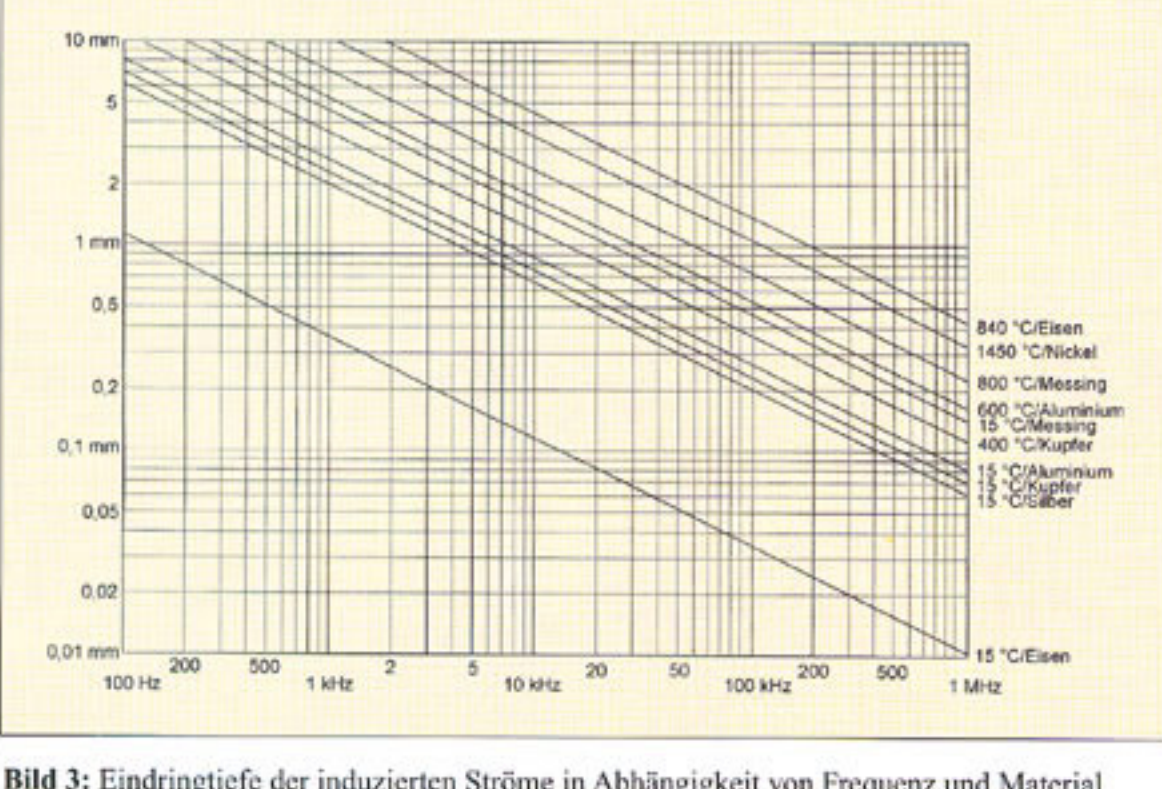
Die Erwärmung mit Gasflamme jedoch erlaubt eine örtliche Erwärmung, aber der Verlauf dauert relativ lange und die Ergebnisse können wegen der sehr problematischen Gasflammenregelung sehr verschieden sein. Diese Faktoren sind der Grund für eine relativ schlechte Lötung mit sehr unterschiedlichen Ergebnissen in Qualität und Materialstruktur.

Bis heute wurde die Induktionserwärmung für diese Anwendung nur selten verwendet obwohl sie einen sehr einfachen Weg bietet, Energie – und damit auch Wärme – auf genau definierte Bereiche zu konzentrieren. Die Energieübertragung liegt um ein bis zwei Größenordnungen über der von Flammen, dadurch ist der Erwärmungsprozess sehr schnell. Ein Hindernis für den Einsatz von Induktionserwärmungsanlagen für

die genannten Anwendungen ist auch das Problem der effizienten Erwärmung von guten nicht ferromagnetischen elektrischen Leitern gewesen. Dieses Problem ist eine Frage der geeigneten Anwendung und des Designs der Induktionsspule. Aluminium ist ein sehr guter Leiter für elektrischen Strom mit geringem elektrischem Verlust. Die thermische Leitfähigkeit von Aluminium ist zum Beispiel viel größer – fast Faktor 3 – als die von Stahl. Es muss deshalb ein starkes elektromagnetisches Feld in der Induktionsspule generiert werden, um eine sehr große Stromdichte an der Oberfläche des erwärmten Materials zu erreichen. Nur dieser Weg bietet die Möglichkeit, den richtigen Erwärmungseffekt zu erzielen. Induktio ist es gelungen, eine Induktionserwärmungsanlage zu entwickeln, welche in der Lage ist,



**Bild 2:** 10 kW Induktionserwärmungsumrichter, Innenansicht  
**Fig. 2:** Inside of 10 kW induction heating converter



**Bild 3:** Eindringtiefe der induzierten Ströme in Abhängigkeit von Frequenz und Material  
**Fig. 3:** Penetration depth of the induced current in dependence on the frequency and the material

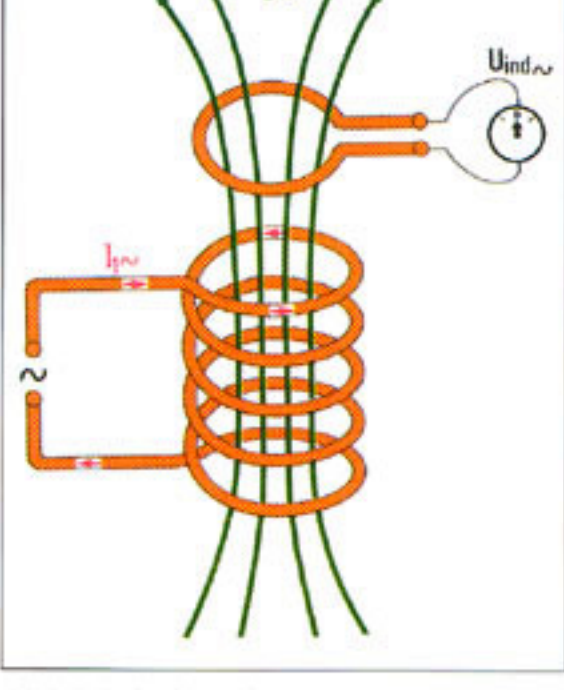
die oben beschriebenen Bedingungen zu erfüllen. Die Erwärmungs- und Hartlötexperimente mit dieser Anlage zeigten sehr ermutigende Ergebnisse und viele mögliche Vorzüge dieses Prozesses. Deshalb und wegen dem großen Interesse der Industrie wurde eine spezielle Anlage nur für das Hartlöten von Aluminium entwickelt (**Bild 1 und 2**).

### Die Induktionserwärmungsanlage

Induktionserwärmung ist ein bekannter Prozess für industrielle Wärmebehandlung von Metallen. Sie wird vor allem für die folgende Zwecke eingesetzt: Glühen, Oberflächen- und Durchhärten, Schmelzen, Hart- und Weichlöten, Rohrschweißen usw.

Die Technologie der Induktionserwärmung ist auf Metalle und einige andere elektrisch leitfähige Materialien wie Graphit, SiC usw. beschränkt. Die Materialien können sowohl ferromagnetisch als auch nicht ferromagnetisch sein. Die Induktionserwärmung von nicht ferromagnetischen Material und speziell von sehr guten elektrischen Leitern wie zum Beispiel Kupfer und Aluminium ist in der Praxis sehr schwer zu realisieren und benötigt eine spezielle Auslegung der Anlage. Um die Problematik der Induktionserwärmung von nicht ferromagnetischen Metallen mit guter elektrischer Leitfähigkeit zu verstehen, muss das Grundprinzip der induktiven Erwärmung erklärt werden:

Induktive Erwärmung wird durch induzierte Wirbelströme im Werkstück verursacht. Die Eindringtiefe der induzierten Ströme von der Oberfläche in das Innere (nur ca. 1/3 der Oberflächenströme ist in dieser Tiefe immer noch aktiv) hängt vom Material und der angewandten Frequenz ab (**Bild 3**). Bei derselben Arbeitsfrequenz haben ferromagnetische Materialien eine höhere Eindringtiefe im Vergleich zu nicht ferromagnetischen Metallen wie Aluminium, Kupfer oder



**Bild 4:** Induzierter Strom in einer einzelnen Windung, positioniert in dem Feld der Multiwindung  
**Fig. 4:** Induced current in one turn coil positioned in the field of multi turn coil called inductor coil

anderen ähnlichen Metallen, die gute elektrische Leiter aufgrund ihrer verschiedenen physikalischen Materialeigenschaften sind.

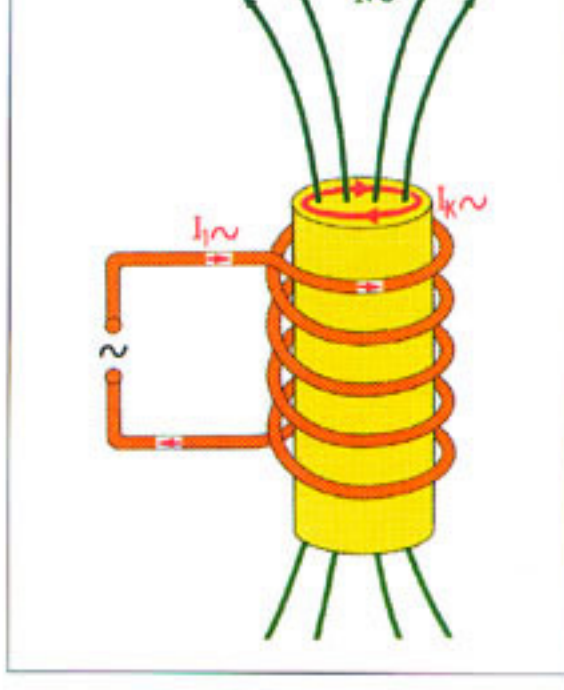
Die thermische Effizienz von Induktionserwärmung könnte nach der folgenden Kretzmann-Annäherungsformel kalkuliert werden:

$$\eta_{th} = \frac{1}{1 + \frac{D}{d} \left( 1 + 6,25 \frac{\delta_2^2}{d^2} \right) \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu \rho_2}}}$$

- h<sub>th</sub> = thermische Effizienz
- D = Durchmesser des Induktors
- d = Durchmesser des Werkstücks
- d<sub>2</sub> = Eindringtiefe des Werkstücks
- μ = Durchlässigkeit des Werkstücks
- t<sub>1</sub> = Widerstandsfähigkeit des Induktors
- t<sub>2</sub> = Widerstandsfähigkeit des Werkstücks

Im Prinzip ist es deshalb notwendig, eine niedrigere Frequenz zu wählen, um dieselbe Stromeindringtiefe wie in nicht ferromagnetischen Metallen – die gute Leiter sind – zu erreichen.

Das nächste Problem entsteht, da auf Grund der guten Leitfähigkeit nur eine geringe Erwärmung solcher Materialien durch die im elektromagnetischen Feld induzierten Wirbelströme stattfindet.



**Bild 5:** Induzierter Strom in einem elektrisch leitenden Teil, positioniert in dem Feld der Induktionsspule  
**Fig. 5:** Induced current in the electrical conductive piece, positioned in the field of induction coil

Deshalb wird ein sehr starkes elektromagnetisches Feld benötigt, um einen ähnlichen Heizeffekt wie im Fall der ferromagnetischen Materialien zu erreichen. **Bild 4** zeigt, wie die induzierten Ströme längs der Achse der Induktionsspule gemessen werden. **Bild 5** zeigt schematisch den Stromverlauf in einem Leitstück.

Unter Berücksichtigung all dieser beschriebenen Effekte, hat Induktio eine spezielle Induktionserwärmungsquelle entwickelt, gute metallische Leiter höchst effizient durch Induktion zu erwärmen. Mit den speziellen Eigenschaften des Schwingungskreises generiert die Anlage eine sehr hohe Spannung und den jeweiligen Strom direkt in der Induktionsspule, was von einem passenden Design des quasi-resonanten Umrichters mit IGBT Leistungstransistoren ermöglicht wird.

Eine wichtige Anforderung, die an alle Anlagen für industrielle Massenproduktion gestellt wird, ist die Wiederholbarkeit des Prozesses zu gewährleisten. Die Lötqualität darf nicht variieren und die Zahl von Ausschussteilen (Leckraten!) muss minimal sein. Neben dem Generator kommt dabei dem Design der richtigen Induktionsspulen, speziell für die Erwärmung von Aluminiumteilen ein

entscheidende Rolle zu. Für einige einfache Geometrien ist diese Aufgabe noch einfach zu lösen, aber es ist viel Erfahrung notwendig, spezielle Induktionsspulen für komplizierte Teile auszuliegen (**Bild 6**).

Ein Beispiel des Lötprozesses mit Induktionserwärmung ist im Diagramm auf **Bild 7** zu sehen. Am Anfang wird eine sehr hohe Leistung eingebracht, die dann in 2 Schritten reduziert wird. Die Temperatur steigt am Anfang rapide an und am Ende wird sie auf den Wert stabilisiert, bei dem das Lotmaterial noch gut fließt. Es ergibt sich eine typische Haltezeit während der das Lotmaterial fließen soll, um eine gute Verbindung der Teile zu erreichen. Die Temperatur ist in % angegeben, wobei 100 % den Schmelzpunkt des Lotes darstellen. Die charakteristischen Schmelztemperaturen von Al Hartloten liegen beispielsweise zwischen 575 und 585 °C.

Die elektromagnetische Felddichte muss der Werkstückform angepasst werden. Es ist notwendig, die Induktionsspule so zu gestalten, dass keine Überhitzung an dünnwandigen Abschnitten des Werkstücks auftritt. Um dieses Problem zu lösen wurden zahlreiche Versuche durchgeführt. Das Ergebnis war ein Induktionsspulendesign, in der die trans-

versale Komponente des elektromagnetischen Feldes Priorität besaß, da hier der Heizeffekt sehr stark von dem Abstand der Werkstückoberfläche zu der Spule abhängt. Mit dem richtigen Spulendesign ist es möglich, genau in den Teilen des Werkstücks mit höherer Materialkonzentration mehr Wärme zu erzeugen und deshalb das Überhitzen der Teile mit kleinerer Materialkonzentration zu verhindern.

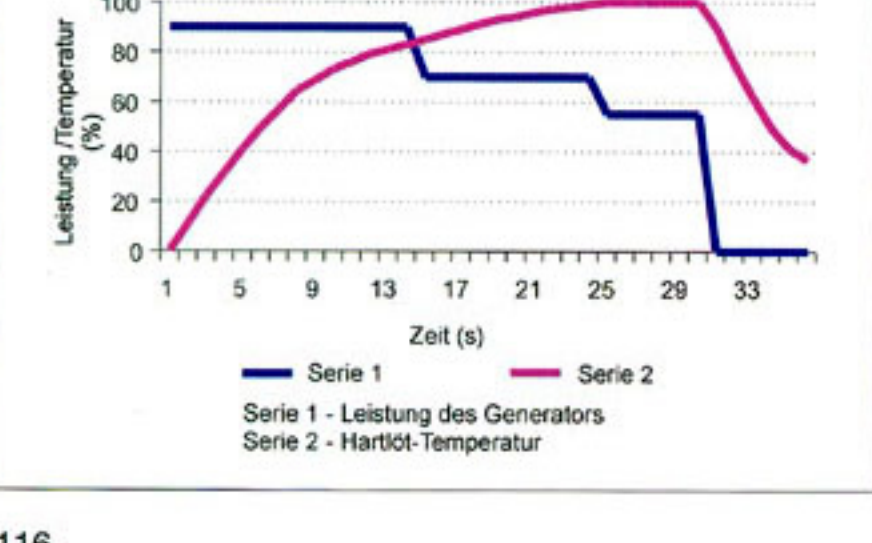
Bei allen Lötprozessen ist es notwendig, das Material auf die richtige Temperatur vorzuwärmen, das Lot zu schmelzen und die Temperatur einige Zeit zu halten. Das Lot muss durch Kapillarkräfte in den Lötspalt gesogen werden. Der Spalt sollte daher eine Breite von 1/10 mm nicht überschreiten. Das am Anfang des Prozesses zugefügte Flussmittel (möglichst korrosionsfrei und leicht zu reinigen) verhindert die Oxidbildung auf der Aluminiumoberfläche und erlaubt somit die Benetzung der Aluminiumoberfläche durch das Lot. Wie bereits beschrieben, liegt der Schmelzpunkt des Lotes und des Aluminiummaterials, welches gelötet werden soll, normalerweise nicht weit auseinander. Deshalb ist es notwendig, die Leistung der Induktionserwärmungsquelle zu reduzieren, wenn das flüssige Stadium des Lötmittels erreicht ist. Diese Reduzierung ist mit einem Induktionserwärmungsumrichter, der von dem PLC-System Simatic S7 gesteuert wird kein Problem.

Aber es ist schwierig, den richtigen Zeitpunkt für die Leistungsreduzierung zu bestimmen. Es wird daher versucht die Leistung des MF-Generators direkt über die am Werkstück mit einem Pyrometer gemessene Temperatur zu steuern. Diese Versuche lieferten jedoch nicht die erwarteten Ergebnisse. Die Pyrometermessung wird einerseits durch Änderung des Emissionsfaktors des Aluminiums während des Erwärms sowie durch Flussmitteldämpfe verfälscht. Deshalb wurde beschlossen, bei der weiteren Entwicklung auf die aufwendige Pyrometer-Messung zu verzichten.

Nach der Entscheidung, die optischen Temperaturmessung mit Pyrometer für diese Anwendung nicht zu verwenden wurde eine empirische Erwärmungslösung entwickelt. Nach verschiedenen Versuchen mit verschiedenen Heizleistungen und Heizzeiten wurde entschieden, eine angepasste Heizkurve für das Material auf Basis von Erfahrungswerten zu pro-



**Bild 6:** Induktionserwärmungsspule für Al-Lötwecke – Beispiele für das Design  
**Fig. 6:** Induction heating coils for Al brazing purposes – examples of the design



**Bild 7:** Induktionslöten – Leistung/Temperatur  
**Fig. 7:** Induction brazing – Power / Temperature



**Bild 8:** Löten von verschiedenen Materialien (Cu/Al, Al/Al) mit Induktionserwärmung  
**Fig. 8:** Brazing with different materials (Cu/Al), Al/Al) by induction heating

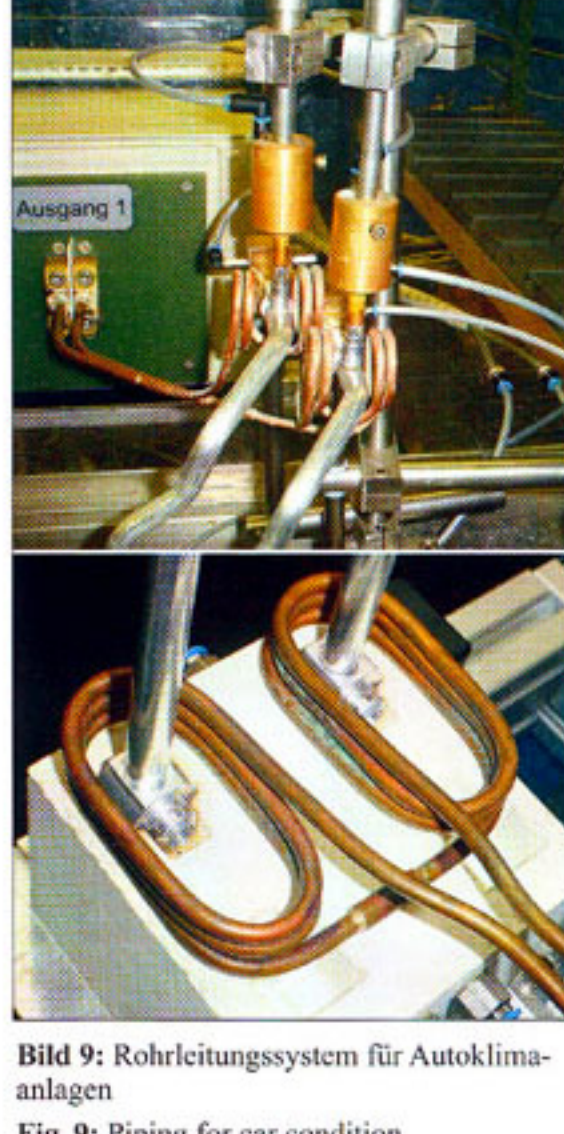
gerufen werden. So ist es möglich, die genannten Parameter anhand empirischer Daten für jedes Werkstück zu definieren und zu optimieren.

### Fazit

Die Ergebnisse der beschriebenen Entwicklungsarbeiten waren sehr nützlich für die industrielle Anwendung des Lötens von Aluminium mit induktiven Anlagen. Sie können ohne Schwierigkeiten auch für das Löten von Kupferteilen übernommen werden (**Bild 8**). Die Temperatursteuerung ist beim Kupferlöten wegen der größeren Differenz von Material- und Lotschmelzpunkt meist weniger kritisch als beim Aluminium.

Es wurde gezeigt, dass die Anwendung von Aluminiumlötten mit induktiver Erwärmung im Vergleich zu anderen Verfahren die größten Vorteile aufweist. Die signifikantesten Vorteile sind:

- ▷ Die Temperatur, die der Verbindung entspricht, die bei dem Löten in einem Vakuumofen/ Schutzgas - Kammerofen oder Banddurchlauföfen erreicht wird.
- ▷ hohe Reproduzierbarkeit des Prozesses mit stark verminderter Zahl von Ausschussteilen
- ▷ sehr hohe Kapazität mit gleichbleibender hoher Produktivität im Vergleich mit anderen Lötprozessen
- ▷ selektive örtliche Erwärmung verbunden mit hoher Effizienz der modernen Induktionserwärmungsanlage bewirkt eine beachtliche Energieeinsparung.



**Bild 9:** Rohrleitungssystem für Autoklimaanlagen  
**Fig. 9:** Piping for car condition

- ▷ umweltfreundlicher Prozess
- ▷ kleiner Platzbedarf, geringe Investitionskosten

Ausgezeichnete Ergebnisse können mit einigen speziellen Lötmitteln und Schmelzmitteln für das Löten von Cu/Al und auch Al/Al Teilen erreicht werden. Einige spezielle Anwendungen sind im **Bild 9** dargestellt.