

Hartlöten von Aluminium

W. Kohlweiler, BrazeTec GmbH, Hanau

Durch Hartlöten lassen sich sowohl Aluminium als auch Aluminiumlegierungen sicher und wirtschaftlich verbinden. Die wichtigsten Lötverfahren werden vorgestellt. Das modernste und zukunftsweisendste ist das Schutzgaslöten. Durch Lötmittel, wie z.B. moderne Pasten, verknüpft mit angepassten Appliziermethoden, kann die Qualität und die Wirtschaftlichkeit des Lötens weiter verbessert werden.

Die zunehmende Nutzung von Aluminium ist auf seine besonderen Eigenschaften zurückzuführen, die die Möglichkeit beinhalten, eine Vielfalt von Legierungen mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften herstellen zu können. Neben dem Schweißen gewinnt zunehmend das Löten als Fügeverfahren an Bedeutung. Viele Produkte aus Aluminium bzw. Aluminiumlegierungen lassen sich sogar nur unter Anwendung des Hartlötens wirtschaftlich herstellen. Die heute bekannten Hartlötverfahren werden nachfolgend mit ihren Besonderheiten dargestellt.

Werkstoffeigenschaften des Aluminiums

Das weiche, dehnbare Aluminium ist mit einer Oxidschicht bedeckt, die eine deutlich höhere Härte als 4000 MPa aufweist und damit sogar den vergüteten Stahl bei weitem übertrifft. Auch chemisch ist diese Oxidschicht sehr beständig. Da sie sich als dichtge-

schlossene, farblose Schicht ausbildet, liegt in dieser Oxidschicht die hohe Korrosionsbeständigkeit von Aluminium und seinen Legierungen an Luft begründet. Diese stabile Oxidschicht stellt gleichzeitig aber hohe Anforderungen an die Füge-technik, da reines Aluminium bei 660°C, Aluminiumlegierungen überwiegend im Bereich von 500 bis 660°C schmelzen. Aluminiumoxid kann dagegen erst bei Temperaturen von über 2000°C verflüssigt werden. In der Spannungsreihe der Metalle zeigt Aluminium ein negativeres Potential als die Schwermetalle. Sogar Zink, das gegenüber Stahl als Opferanode fungieren kann und deshalb als Korrosionsschutz gerne verwendet wird, ist noch etwas edler als Aluminium. Daher sind Kombinationen mit Schwermetallen aus korrosionstechnischer Sicht stets problematisch. Aluminiumlegierungen, die Schwermetalle enthalten, verlieren allerdings im allgemeinen auch an Korrosionsbeständigkeit im Vergleich mit reinem Aluminium.

Hartlote

Zum einen aufgrund der Schmelztemperatur von Aluminium und seinen Legierungen und zum anderen bedingt durch die notwendige Korrosionssicherheit der Lötverbindung scheiden Schwermetallhartlote zum Löten von Aluminium aus. Es werden daher Lote auf Aluminiumbasis angewendet, die keine oder nur

geringe Gehalte an Schwermetallen und mindestens 70 % Aluminium enthalten. Damit ergeben sich Legierungen, die selbst als Aluminiumlegierung betrachtet werden müssen und häufig mit ihrem Schmelzintervall im Bereich der verwendeten Aluminiumlegierungen liegen. Aus Festigkeits- und korrosions-chemischer Sicht haben sich Lote des Systems Aluminium-Silizium mit Siliziumgehalten zwischen 7% und 13% bewährt. Diese Legierungen besitzen Schmelztemperaturen im Bereich von 575°C -615°C. Standard ist dabei das Hartlot AL 104 mit einem Schmelzintervall von 575 - 585°C. Die Arbeitstemperatur dieses Lotes beträgt 585°C, wobei die mit dem Lot hergestellten Verbindungen eine gute Korrosionsbeständigkeit zeigen. Da beim Löten der Grundwerkstoff nicht angeschmolzen werden darf, können mit diesem Lot nur Werkstoffe gelötet werden, deren Schmelzintervall oberhalb der Verarbeitungstemperatur des Lotes (Mindesttemperatur, die beim Löten erforderlich ist) liegt. Damit ergibt sich, dass in erster Linie Reinaluminium und solche Aluminiumlegierungen gelötet werden, deren Schmelzintervall oberhalb von 640°C liegt. In der Praxis bedeutet dies, dass überwiegend Reinaluminium und AlMn 1 als Legierung hartgelötet werden.

Eine Übersicht über lötgeeignete und nicht lötgeeignete Aluminiumlegierungen zeigt Tafel 1.

Tafel 1: Übersicht über die Lötbarkeit von Aluminium (nach: Aluminium-Taschenbuch)

Werkstofftyp	Hartlöten	Weichlöten	Bemerkungen
Knetwerkstoffe: Rein- und Reist- aluminium	gut	gut	
AlMn	gut	gut	
AlMg	bedingt	gut	Mg-Gehalte > 0,6 % erschweren die Benetzung
AlMgSi	gut	gut	Festigkeitsabfall beachten! Nach Hartlöten Aushärten möglich
AlCuMg AlZnMg AlZnMgCu	nicht geeignet	möglich	Hartlöten bewirkt irreversible Werkstoffschädigungen, Weichlöten bewirkt erheblichen Festigkeitsabfall
Gusslegierungen	s. Bemerkung	bedingt	Hartlöten mit den in Deutschland genormten AlSi- Loten schwierig, da die Solidustemperatur des Grund- werkstoffes überschritten wird. In den USA sind Lote der Typen AlSi10Cu4 (4145) und AlSi10Zn10Cu4 (4245) verfügbar, deren Solidustemperaturen bei 520°C bzw. 515°C liegen.

Verfahrenstechnik beim Löten von Aluminium

Zum Löten benötigt man neben dem geeigneten Lot stets noch ein Medium, das die Oberflächenoxide vom Grundwerkstoff beseitigt und diesen während des Lötens metallisch blank hält. Zu diesen Medien gehört neben Schutzgasen und Flussmitteln auch das Vakuum. Um die Wirksamkeit einzelner Medien zu verstehen, muss erneut die Besonderheit der Aluminiumoxidhaut betrachtet werden. Aluminium besitzt eine sehr hohe Affinität zum Sauerstoff. Daher ist Aluminium an Luft stets mit einer Oxidhaut überzogen. Diese ist gleichmäßig und porenarm, so dass sie das Aluminium gegen weitere Korrosion, z.B. gegen Luft und Industriatmosphäre, schützt. Die blanken Aluminiumfassaden vieler Gebäude belegen dies. Zum Löten muss die Oxidhaut entfernt werden, wozu drei Möglichkeiten zur Verfügung stehen:

1. Auflösen der Oxidhaut
2. Reduzierung der Oxidhaut
3. Mechanisches Zerreißen und Abheben der Oxidhaut

Hinzu kommt, dass sich die Aluminiumoxidschicht während des

Lötprozesses nicht wieder neu ausbilden darf.

Vakuumlöten

Die Besonderheit des Vakuumlötens liegt darin, dass das Aluminiumoxid durch das Vakuum nicht entfernt werden kann, so dass der Mechanismus des Lötvorgangs wie folgt abläuft: Der Ausdehnungskoeffizient von Aluminium ist etwa dreimal so hoch wie der von Aluminiumoxid. Daher reißen die Oxidschichten beim Erwärmen auf und das flüssige Lot kann durch diese Risse hindurch zum blanken Grundwerkstoff vordringen. Dabei hebt es die Aluminiumoxidschicht mechanisch ab. Das Oxidieren des Aluminiums während dieser Aufheizphase in den Rissen kann nur verhindert werden, wenn die Umgebung völlig frei von Sauerstoff ist. Hierzu ist nicht nur eine Mindestanforderung an das Vakuum zu stellen (10^{-4} mbar oder besser), sondern es sind noch zusätzlich Getterwerkstoffe einzusetzen, um so auch die letzten Sauerstoffatome aus der Umgebung des zu lötenen Bauteils

abzufangen. Es ist offensichtlich, dass ein solches Verfahren zwar möglich aber aufwendig ist. Daher hat auch das Vakuumlöten gegenüber dem Flussmittellöten eine geringere Bedeutung behalten.

Lötverfahren unter Anwendung von Flussmitteln

Flussmittel

DIN EN 1045 unterscheidet prinzipiell zwei Flussmitteltypen, die in der Norm wie folgt beschrieben werden:

1. Typ FL 10

Diese Flussmittel enthalten hygroskopische Chloride und Fluoride, vor allem Lithiumverbindungen. Die Rückstände sind korrosiv und müssen durch Waschen oder Beizen entfernt.

2. Typ FL20

Diese Flussmittel enthalten nicht hygroskopische Fluoride. Die Rückstände sind im allgemeinen nicht korrosiv und können auf dem Werkstück verbleiben, aber

die Lötverbindung sollte vor Wasser oder Feuchtigkeit geschützt werden.

Um den Vergleich der Flussmittel besser zu veranschaulichen, sind die Vor- und Nachteile des jewei-

ligen Typs in Tafel 2 zusammengefasst. Das Bild 2 demonstriert wesentliche Unterschiede der beiden Flussmitteltypen.

Tafel 2: Vor- und Nachteile der Flussmitteltypen im Vergleich

	Vorteile	Nachteile
FL 10 (chloridischer und hygroskopischer Typ)	Wirksam ab 500°C Hohe Wirksamkeit, auch AlMg3 kann gelötet werden, Bauteile sind nach dem Waschen sauber, Beizbehandlung nach dem Waschen zur Verbesserung des Aussehens möglich.	Reste sind sehr korrosiv, Reste müssen abgewaschen werden, Waschwasser ist zu entsorgen (teuer), Beizbehandlung wird selten durchgeführt, da aufwendig und damit teuer, hohe Belastung der Abluft bzw. Umgebung.
FL 20 (nicht chloridisch, nicht korrosiv)	Reste nicht korrosiv, Kein Waschen nach dem Löten, (Arbeitsgang entfällt) Kein Waschwasser zu entsorgen Hoher Spaltfüllgrad Sehr geringe Belastung des Lötovens Unter Schutzgas deutlich reduzierter Verbrauch (auf ca. 20% des FL 10 Einsatzes an Luft)	Wirksam ab ca. 570°C, Salzreste auf dem Bauteil (Optik), Wirksamkeit etwas geringer als FL 10, AlMg kann nur bis 0,9 % Mg benetzt werden. Fast keine Belastung der Umwelt

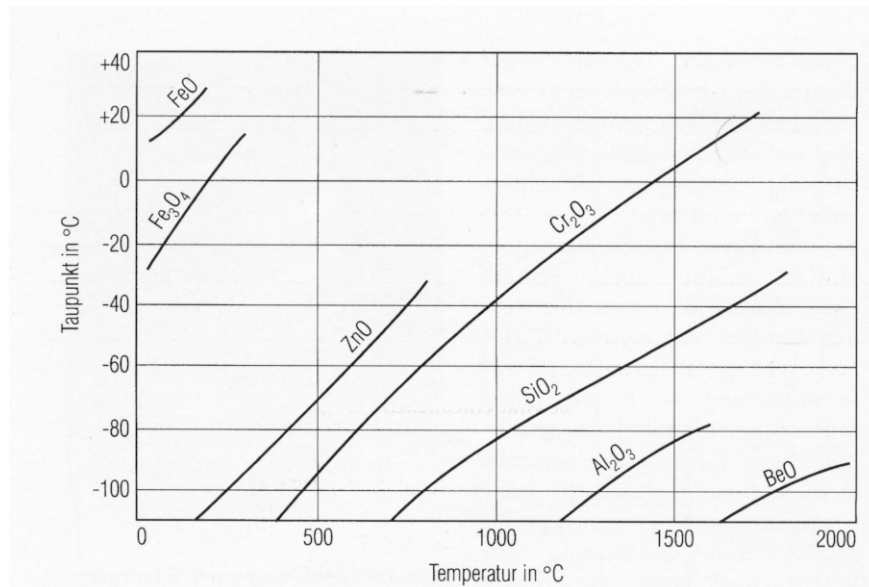


Bild 1: Metall-Metalloxid-Gleichgewichte in Wasserstoff (Bilder: BrazeTec)

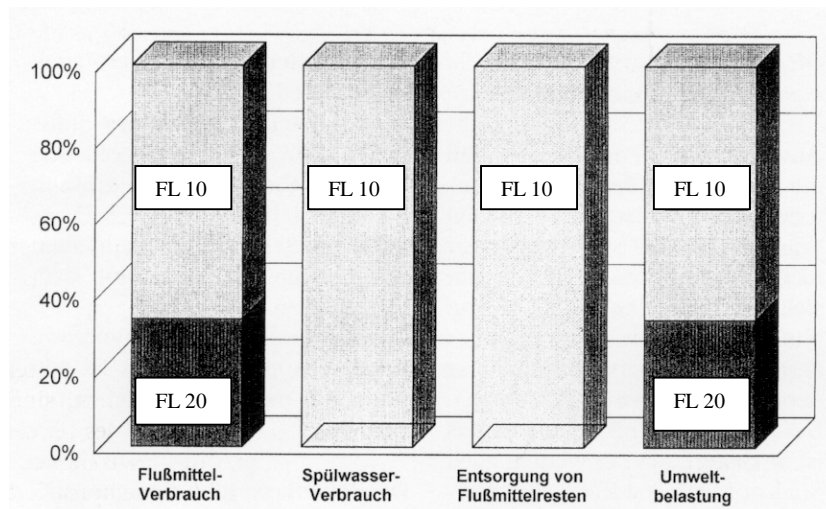


Bild 2: Unterschiede bei der Anwendung von Aluminium-Flussmitteln

Flammlöten

Beim Flammlöten werden die Bauteile mit dem Brenner auf Löttemperatur erwärmt. Als Brenngase finden Erdgas bzw. Stadtgas sowie Propan aber auch Azetylen Verwendung. Die Brenngase werden kombiniert mit angesaugter Luft, Druckluft und gelegentlich auch mit Sauerstoff.

Beim Brennerlöten von Hand wird das Bauteil im Lötbereich mit Flussmittel eingestrichen und das Lot nach Aufschmelzen des Flussmittels meistens als Stab an der Lötstelle angesetzt und abgeschmolzen. Aber auch der Einsatz von Lotformteilen findet bei der Handlötung Anwendung. Bei größeren Stückzahlen wird in den letzten Jahren zunehmend die Verarbeitung auf brennerbeheizten Lötmaschinen vorgenommen. Die Arbeitsweise ähnelt der des Handlötens, es werden aber in stärkerem Maße Lotformteile angewendet. Bei Lötmaschinen kommt häufig Lotpaste zum Einsatz, soweit die Bauteilgeometrie ihre Anwendung ermöglicht. Beim Pastenlöten muss eine Deponiermöglichkeit für die Paste gegeben sein.

Zudem muss der Wärmeführung besondere Beachtung geschenkt werden, da das Pastenlöten auf Fehler in der Wärmeführung empfindlich reagiert. Pasten sind grundsätzlich Mischungen aus Lotpulver, Flussmittel und einem organischen Binder. Der organische Binder hat die Aufgabe, die Mischung aus Lotpulver und Flussmittel in eine dosierbare Form zu bringen. Darüber hinaus erwartet man vom Pastenbinder spezifische Eigenschaften, so z.B. Verbleiben an der Lötstelle bis zum Aufschmelzen des Flussmittels, danach aber rückstandsfreie Verbrennung bzw. Verdampfung bis zum Erreichen der Löttemperatur.

Pasten können sowohl korrosives als auch nicht korrosives Flussmittel enthalten. Bei Flammlötungen werden heutzutage noch überwiegend Pasten mit korrosivem Flussmittel eingesetzt, vor allem deshalb, da optisch blanke, gut aussehende Bauteile gewünscht werden, was durch die Wasserlöslichkeit der Flussmittelreste erreicht wird. Die nicht korrosiven Flussmittel überziehen

dagegen die Lötstelle mit einem gleichmäßigen Salzfilm.

Induktionslöten

Das Induktionslöten von Aluminium wird fast ausschließlich zum Kompensbodenlöten eingesetzt. Beim Kompensbodenlöten handelt es sich um die Verbindung einer Aluminiumplatte mit einem Chromnickelstahl-Kochtopf. Die Lötung wird wie folgt durchgeführt:

Das Flussmittel wird mit Wasser oder mit Wasser-Alkohol-Mischungen im Verhältnis von ca. 1 : 1 bis 1 : 2 zu einer Paste angefeuchtet. Diese Paste wird mit dem Pinsel auf den Kompensboden aufgetragen. Auf den mit Flussmittel benetzten Kompensboden wird dann Lotkörnung des Typs AL 104, Körnung 100- 315 pm, aufgestreut. Anschließend werden die beiden Bauteile positionsgenau in einer Lötresse zusammengesetzt. In einem der beiden Pressstempel ist eine Mittelfrequenz-Induktionsspule eingebaut. Durch den Mittelfrequenzstrom wird das Bauteil auf Löttemperatur erwärmt.

Nach dem Schmelzen des Lotes wird ein definierter Druck aufgebracht, der den Kompensboden fest an den Kochtopfboden anpresst. Danach wird der Strom abgeschaltet und die Lötverbindung erkaltet im gepressten Zustand.

Nach Erstarren des Lotes wird der fertige Topf aus der Presse herausgenommen und anschließend gesäubert, d.h. eventuelle Flussmittelreste werden entfernt, Unebenheiten der Lothohlkehle werden mit einem Stichel auf der Drehbank überarbeitet. Für diese Lötung wird lediglich das nicht korrosive Flussmittel verwendet, in zunehmendem Maße in Form von Hartlotpaste. Diese enthält - wie bereits ausgeführt - sowohl das Lot als auch das nicht korrosive Flussmittel und wird mit dem Pinsel gleichmäßig auf die Ronde aufgetragen. Da die Paste bereits Lot enthält, entfällt das Aufstreuen des Lotpulvers. Man spart somit einen Arbeitsgang.

Salzbadlöten

Beim Salzbadlöten werden die zusammengesetzten, gegeneinander fixierten Bauteile in das geschmolzene Flussmittel eingetaucht. In der Regel wird mit eingelegetem Lotformteil gearbeitet oder mit lotdubliertem Material. Die Vorteile des Verfahrens sind:

- Das Eintauchen in das geschmolzene Flussmittelbad erspart eine besondere Flussmittelapplikation.
- Die Wärmeübertragung ist recht gleichmäßig, so dass dünnwandige, kompliziert geformte Bauteile bearbeitet werden können. Das Einhalten enger Fertigungstoleranzen ist möglich.
- Wie beim Ofenlöten können viele eng beieinanderliegende Lötstellen in einem Arbeitsgang gelötet werden.

- Bedingt durch die stützende Wirkung des geschmolzenen Flussmittelbades unter gleichmäßiger Wärmeerbringung hat sich dies, vor allem für die Lötung dünnwandiger Teile wie Radiatoren, Konvektoren usw. bewährt.

Nachteilig ist, dass das Verfahren die Umwelt stark belastet. Es entstehen nicht nur korrosive Dämpfe, sondern es wird auch vergleichsweise viel Flussmittel verbraucht. Da meistens korrosive Flussmittel verwendet werden, entstehen große Mengen Abwasser, die mit entsprechendem Aufwand zu entsorgen sind. Die Anwendung des Verfahrens ist daher rückläufig.

Offenes Ofenlöten

Beim offenen Ofenlöten werden überwiegend lotplattierte Bauteile verarbeitet, aber auch die Anwendung von Lotformteilen ist üblich. Die Lötstellen werden mit Flussmittel benetzt, anschließend fährt man das Bauteil durch den Ofen. Da die Lötung an Luft erfolgt, muss für diesen Lötvorgang ein korrosives Flussmittel eingesetzt werden. Folglich entstehen korrosive Dämpfe, die den Ofen in kurzer Zeit zerstören würden. Zum Schutz des Ofens verwendet man Chromnickelstahl-Muffeln (teuer), die die Ofenausmauerung und Heizung gegen die Flussmitteldämpfe schützen.

Bei ständigem Betrieb kann aber eine solche Muffel auch innerhalb eines halben Jahres zerstört werden. Darüber hinaus ist ein Abziehen und Neutralisieren der Dämpfe notwendig. Nach dem Löten müssen die Flussmittelreste gründlich vom Bauteil abgewaschen werden.

Bedingt durch die hohe Umweltbelastung bzw. Kosten für Muffel und Entsorgung für Waschwasser geht die offene Ofenlötung ständig zurück.

Ofenlöten unter kontrollierter Atmosphäre

Aus Bild 1 ist zu entnehmen, dass die Reduktion der Aluminiumoxidschicht selbst unter reinem Wasserstoff bei Löttemperatur nicht möglich ist. Daraus ergibt sich der Zwang zum Einsatz von Flussmitteln auch unter Schutzgasatmosphäre. Es wird jedoch nur der nicht korrosive Typ eingesetzt. Das meistverwendete Schutzgas ist Stickstoff, aber es werden auch Stickstoffwasserstoffmischungen eingesetzt.

Wasserstoffhaltige Schutzgasatmosphären verwendet man vor allen Dingen dann, wenn z.B. Aluminium an Chromnickelstahl gelötet werden soll (Bild 3). Das Verfahren besitzt eine Reihe von Vorteilen:

- Gegenüber dem offenen Ofenlöten ist der Flussmittelverbrauch deutlich reduziert.
- Die Ofenmuffel kann aus einfachem Stahl gefertigt werden und hat eine Lebensdauer von deutlich mehr als 1 Jahr.
- Bei dieser Lötung verbleiben nur geringe Salzreste auf dem Bauteil.
- Es ist weder ein Waschvorgang noch sonstige Nacharbeit an den Bauteilen nach dem Löten erforderlich.

Die Bauteile werden zunächst entfettet. Dies kann erfolgen durch organische Lösungsmittel, alkalische Reiniger oder vorzugsweise durch eine Wärmebehandlung zwischen 150°C bis 250°C. Nach dem Entfetten wird das Bauteil mit einer Flussmittelsuspension eingesprüht.

Die Konzentration liegt üblicherweise zwischen 5 bis 10%. Überschüssige Suspension wird abgeblasen und dann das Bauteil bei ca. 500°C in einem Durchlaufofen getrocknet.

Alternativ hierzu sind auch Verfahren üblich, bei denen Flussmittelpulver auf das vorgewärmte Bauteil aufgebracht wird (Neuentwicklung).

Der eigentliche Lötprozess erfolgt nach dem Aufbringen des Flussmittels derart, dass das Bauteil durch einen Schutzgasofen hindurchgeführt wird. Dieser ist nach außen durch Glasfaservorhänge gegen Luft so „abgeschlossen“, dass die Bauteile ein und ausfahren können, ohne dass es zu unerwünschtem Luftzutritt in das Ofeninnere kommt. Der Wasserdampfgehalt des verwendeten Schutzgases bzw. der Sauerstoffgehalt liegt bei < 100 ppm. Nach dem Verlassen des Behandlungs-ofens sind die Bauteile fertig und können vom Förderband entnommen werden. Eine weitere Behandlung ist nicht erforderlich (Bild 4).



Bild 3: Pastenlötung unter Schutzgas an einem Durchlauf-erhitzer (Aluminium an vernickelten Stahl)



Bild 4: Aluminiumkühler, unter Schutzgas gelötet und lackiert; im Vordergrund ein Aluminiumverdampfer (gelötet und chromatiert)

Ausblick

Von den vorgestellten Lötverfahren stellen das Ofenlöten unter kontrollierter Atmosphäre heute das wichtigste Verfahren dar. Dieses Verfahren bietet Kostenvorteile, weil der Flussmittelverbrauch deutlich reduziert ist und die Belastung der Umwelt im Vergleich mit dem offenen Ofenlöten und dem Salzbadlöten deutlich verringert wird. Die Bedeutung dieses Verfahrens wird daher auch in Zukunft noch weiter zunehmen.

Durch Paste können Lötresultate in manchen Fällen optimiert werden, vor allem aber ist in vielen Fällen eine erhebliche Rationalisierung möglich.

Moderne Fertigungen haben schon vom getrennten Zuführen von Loten und Flussmitteln von Hand auf voll automatische Pastendosierung umgestellt. Die Anwendung von Pasten wird außerdem durch neue Appliziermethoden begünstigt.

Unter dem Namen "BrazeSkin" wurde von der BrazeTec GmbH ein Verfahren patentiert, das das Aufbringen gleichmäßig dünner Lotschichten ermöglicht. Dies ist auch bei schwierigen geometrischen Verhältnissen möglich. In vielen Fällen ist für mehrere Lötstellen an einem Bauteil nur ein einziger Appliziervorgang notwendig.

Die dünne gleichmäßige Verteilung des Lotes reduziert darüber hinaus die Neigung, den Grundwerkstoff während des Lötvorgangs anzulegieren.