

## Löten in der Luftfahrtindustrie

Grünendick, T.

*Das Löten ist in der Luftfahrtindustrie ein unverzichtbares Verfahren geworden. Die angewendeten Lötverfahren dienen zur Herstellung hochfester, oxidationsbeständiger Bauteile mit komplexer Geometrie und unterschiedlichen Werkstoffkombinationen sowie zur Rekonditionierung von verschlissenen Komponenten.*

*Brazing is getting an absolutely essential procedure in the aviation industry. The used methods are for the production of heavy strong and steady oxidation resistant materials with complex geometry and different material combinations as well as for recondition of worn components.*

### 1 Ursprung des Lötens

Die DIN 8505 beschreibt das Löten wie folgt:

*„Löten ist ein thermisches Verfahren zum stoffschlüssigen Fügen und Beschichten von Werkstoffen, wobei eine flüssige Phase durch Schmelzen eines Lotes (Schmelzlöten) oder durch Diffusion an den Grenzflächen (Diffusionslöten) entsteht. Die Solidustemperatur der Grundwerkstoffe wird nicht erreicht.“ /1/*

Sucht man mit dieser Definition nach den Anfängen des Lötens, so wird als erstes geschichtliches Datum der Löttechnik etwa das Jahr 5000 v. Chr. genannt. Hierbei handelte es sich zunächst um mittels dem Lötverfahren gefertigte Gold- und Silberschmuckstücke. Aber auch als Substitution des Nietens wurde das Löten eingesetzt, wie z.B. für die Grabbeigaben des Pharaos Tut-ench-Amun.

Im Verlauf der Geschichte war die Löttechnik von vielen Zufällen begleitet, die durch unkonventionelle Denkprozesse vieler Handwerker eine kontinuierliche Entwicklung erfuhren. So erscheint es auch nicht verwunderlich, dass die Philosophen Hypokrates und Theophrast die Beschreibung des Lötverfahrens in ihren Werken aufnahmen.

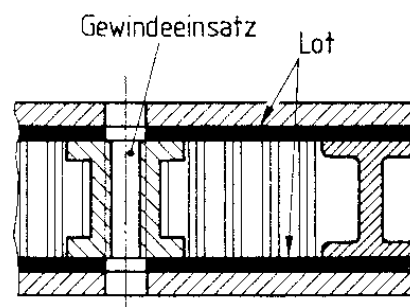
Als ein Beispiel der Kreativität auf dem Gebiet der Löttechnik sei das Patent des Engländers Durand genannt. Dieses Patent erhielt er 1810 auf eine gelötete kombinierte Fügeverbindung (Formschluss-Stoffschluss-Verbindung) zur Herstellung und zum Dichtlöten von Konservendosen. Eher

zufällig wurde dagegen 1906 bei General Motors das Schutzgas-Hartlöten entdeckt, /2/.

Mit dem Beginn intensiver Arbeiten auf dem Gebiet der Luft- und Raumfahrt wurde die Forderung der Industrie nach hochfesten und oxidationsbeständigen Lötverbindungen immer stärker, insbesondere für Verbindungen mit unterschiedlichen Werkstoffen. Zu Anfang erfüllten die Gold-Basis-Lote (B-Au 4 [82 Au 18 Ni]) alle Wünsche der Luft- und Raumfahrtkonstrukteure, da sie die nötige Festigkeit, Zähigkeit und Heißgaskorrosionsbeständigkeit gewährleisten. Doch die hohen Kosten verdrängten die Gold-Basis-Lote überwiegend durch die Nickel-Basis-Lote, die bei ähnlichen Eigenschaften um ein vielfaches kostengünstiger sind. Aber auch andere Lote, meist auf Edelmetallbasis (Silber, Palladium), wurden entwickelt. Hergestellt werden diese Lötverbindungen, die überwiegend für die Triebwerkstechnologie eingesetzt werden, in einem Vakuumhartlotverfahren.

### 2 Das Hochtemperaturvakuumlöten

Das Löten im Vakuumofen hat sich für das Fügen hochbeanspruchter Konstruktionen aus Nickel, Titan, Zirkonium, Cobalt und hochwarmfesten Stählen im Flugzeugbau bestens bewährt. Durch die gleichmäßige Wärmeführung im Ofen werden Verformungen der Werkstücke und Wärmespannungen vermieden. Eine Regenerierung der Grundwerkstoffeigenschaften durch geeignete Wärmevor- und -nachbehandlung lassen sich ebenfalls durchführen (Spannungsarmglühen oder Ausscheidungsglühen).



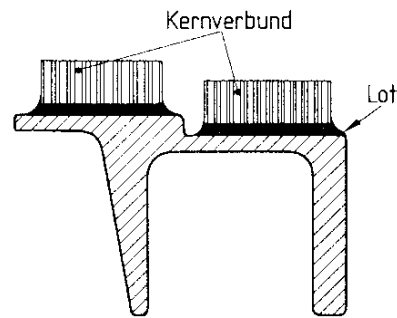
**Bild 1:** Kernverbund mit Gewindeeinsatz und Abschlussprofil, /3/

Das Vakuum (bis  $10^{-6}$  mbar) und der Einsatz von Inertgas verringert die Oxidation derart, dass ohne Flussmittel gearbeitet werden kann und somit enge Lötspalte vorgesehen werden können. Oft sind enge Spalte metallurgisch erforderlich, um Verbindungen hoher Festigkeit zu erhalten. Dies ist besonders wichtig bei der Herstellung hochbeanspruchter Teile, wie Turbinenschaufeln aus hochhitzebeständigen Werkstoffen, Verdichterslaufrädern sowie Honigwabenkonstruktionen, (**Bild 1** und **Bild 2**). Werden die engen Lötspalte beispielsweise beim Nickel-Basis-Lot nicht eingehalten, so bilden sich in der Lötnaht sehr harte intermetallische Phasen, die zum Versagen der Verbindung führen. Weniger problematisch ist dies beim Gold-Basis-Lot; hier nimmt die Festigkeit mit steigendem Lötspalt nur langsam ab. **Tab. 1** zeigt die Lötspaltbreite in Abhängigkeit von Lottyp, Lötverfahren und Arbeitstemperatur.

Lottyp	Lötspalt in mm	Herstellungsverfahren	Arbeitstemperatur
L-Ag	0,1 bis 0,15	mit Flussmittel	900°C - 1000°C
	0,01 bis 0,05	Vakuum, reduzierende Atmosphäre	
L-Au	0,01 bis 0,05	Vakuum, reduzierende Atmosphäre	950°C
L-Ni	0,01 bis 0,05	Vakuum, reduzierende Atmosphäre	900°C - 1200°C
L-Co	0,01 bis 0,05	Vakuum, reduzierende Atmosphäre	1150°C
L-Ti	0,01 bis 0,07	Vakuum, reduzierende Atmosphäre	940°C

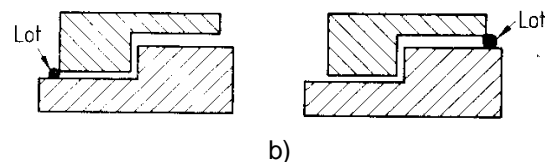
**Tab. 1:** Lötspaltbreite in Abhängigkeit von Lottyp und Lötverfahren

Die minimal geforderte Lötspaltbreite muss natürlich unter Berücksichtigung der Formabweichungen, der Dehnungen und der Vorrichtungen zur Fixierung der Lötteile auch bei Erwärmung auf die Löttemperatur gegeben sein. Dabei sollte der Lötspalt parallel oder verengend in Flussrichtung des Lotes verlaufen und eine Mittenrauigkeit von  $R_a = 12,5 \mu\text{m}$  nicht übersteigen. Bereiche, die nicht mit Lot benetzt werden dürfen, können durch oxidkeramische Lot-Stop-Pasten abgegrenzt werden. Diese Pasten werden aufgetragen und nach der Lötung wieder mit Reinigern abgewaschen. Die **Bilder 3 bis 5** zeigen einige Beispiele.

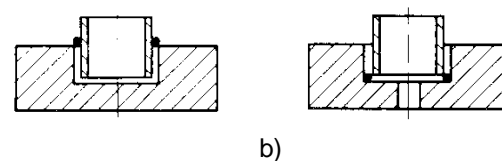


**Bild 2:** Hochtemperatur-Löten von Kernverbund-Turbinendichtungen, /3/

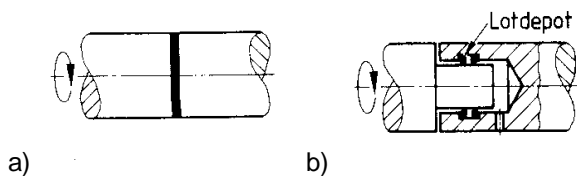
Außerdem werden im Vakuum beispielsweise bei Titan und Zirkonium, die mit der Atmosphäre reagieren, ein schädliches Verspröden der Werkstoffe vermieden. Titanlegierungen (TiAl6V4) sind aufgrund ihrer speziellen Eigenschaften (bei ca. 60% des Stahlgewichtes weisen Titanlegierungen eine sehr hohe Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit auf) ein in der Luftfahrtindustrie oft verwendeter Werkstoff, insbesondere für Anwendungen, bei denen geringe Massenkräfte gefordert werden. Zum Fügen von Titanlegierungen untereinander und in Kombination mit anderen Werkstoffen werden niedrigschmelzende Titan-Basis-Lote verwendet, die werkstoffähnliche mechanische Eigenschaften aufweisen.



**Bild 3:** a) unzureichende lötgerechte Gestaltung  
b) Lot in Richtung der Verengung fließen lassen, /3/



**Bild 4:** a) unzureichende lötgerechte Gestaltung  
b) zweckmäßige lötgerechte Gestaltung, da das Lot von innen nach außen fließt, /3/



**Bild 5:** a) unzuweckmäßige lötgerechte Gestaltung  
b) zweckmäßige lötgerechte Gestaltung zur Übertragung größerer Torsionskräften, /3/

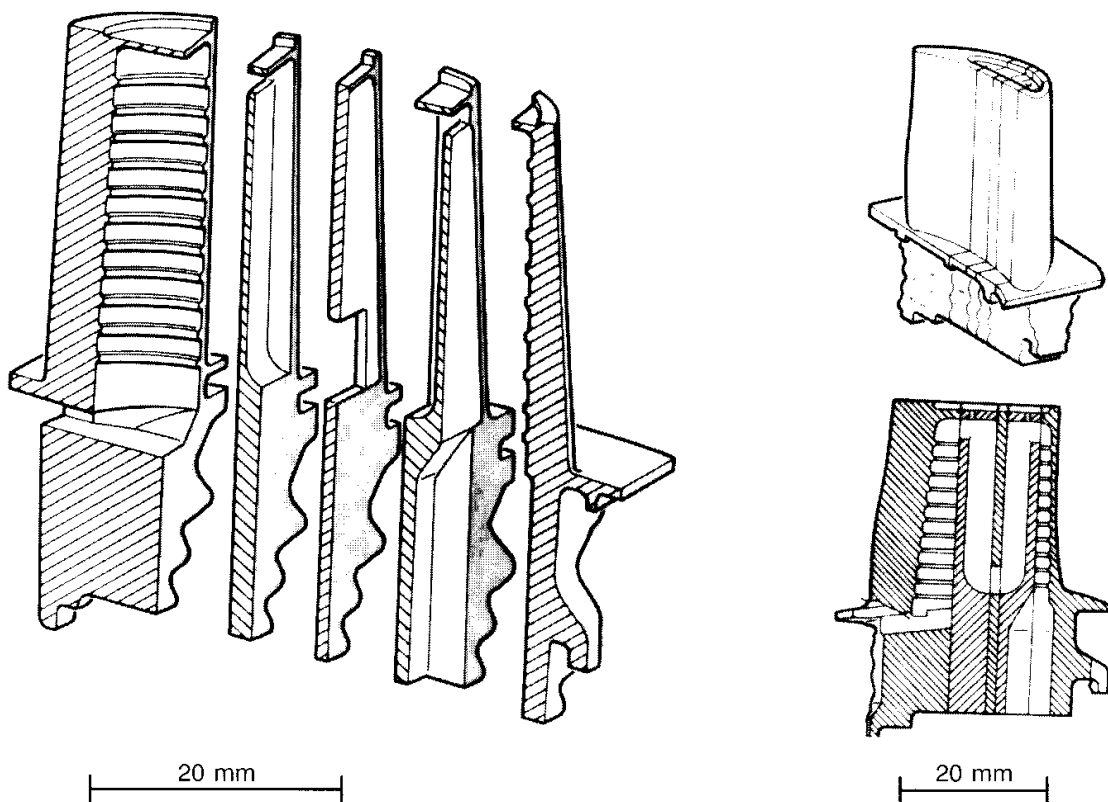
Das Lot kann als Formteil, Paste oder Pulver verwendet werden. Trotz der Selbstreinigungseffekte im Vakuumofen sollte die Lötstelle von Oxiden, Fett und Schmutz chemisch oder mechanisch gereinigt sein. Dieser Selbstreinigungseffekt entsteht durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Oxide und des Metalls, die ein Aufreißen der Oxidhaut bewirken und dem Lot das Benetzen des Metalls durch unterwandern der Oxidhaut ermöglichen. Die Affinität der Metalle bei hohen Temperaturen eine bestimmte Oxidmenge aufzunehmen und die Reduzierung der Oxide von im Vakuum befindlichem Restgas tragen außerdem zum

Selbstreinigungseffekt positiv bei.

Neben der Herstellung hochbeanspruchter Lötverbindungen, z. B. zum Einlöten von Verdichterschaukeln, eignet sich das Hochtemperaturlöten zur Rekonditionierung von beschädigten Schaukeln oder Labyrinthdichtstege. Die Schaukeln verschleifen im Blattbereich durch Erosion und thermischer Ermüdung. Zur Reparatur dieser beschädigten Flächen werden Lötfolien aufgetragen und bei hoher Temperatur festgelötet. Dabei erreichen diese Beschichtungen die Festigkeitswerte des Grundmaterials und in einigen Fällen sogar höhere.

### 3 Diffusionslöten

Beim konventionellen Löten wird das flüssige Lötgut durch Wärmeabfuhr unterkühlt und es erfolgt eine thermische Erstarrung (Bindung). Im Gegensatz zum konventionellen Löten wird beim Diffusionslöten die Löttemperatur solange gehalten, bis durch Diffusion zwischen Grundwerkstoff und flüssigem Lot das Lotgut bei Löttemperatur erstarrt. Ein großer Vorteil ist hierbei die erhöhte Wiederaufschmelz- oder Auslösetemperatur der Lötverbin-



**Bild 6:** Diffusionslötung mit hoher Festigkeit einer Laufschaufel aus einfachen Gussteilen (Prototypen), /4/

dung. Damit wird die Verbindung auch bei Temperaturen oberhalb der Löttemperatur mechanisch belastbar. **Bild 6** zeigt einen Prototypen einer Laufschaufel, die mittels Diffusionslötung aus einzelnen Gussteilen gefügt wird. Hier kommen überwiegend Nickel-Bor-Folien zum Einsatz.

#### 4 Perspektiven der Löttechnik

Die Löttechnik wird auch in Zukunft insbesondere für inkompatible Werkstoffe, die wegen ihrer schlechten Benetzbarkeit und teilweise stark unterschiedlichen Eigenschaften (z.B. Ausdehnungsverhalten) äußerst schwierig zu verbinden sind, eine gute Fügealternative bieten. So wird in zahlreichen Arbeiten /5/, /6/ das Fügen von Oxid- und Nichtoxidkeramiken untereinander bzw. mit metallischen Werkstoffen untersucht. Das Löten kann sowohl auf konventioneller Weise mit metallisierter Oberfläche, über Diffusionslöten als auch mit Aktivloten erfolgen. So wird z.B. Nickel-Basis-Lot zum Verbinden von Siliziumnitrid-Molybdän-Verbunden (Anwendungstemperatur ca. 1200°C) und Silber-Kupfer-Basis-Aktivlot im Vakuumofen für Aluminium-Siliziumcarbid-Verbunde eingesetzt.

Ein weiteres vielversprechendes Gebiet erschließt sich für das Löten von Werkstoffen auf der Basis von intermetallischen Verbindungen, wie z.B. Titan- und Nickelaluminide. Diese Werkstoffe besitzen Eigenschaften, die zwischen denen der metallischen und der keramischen Werkstoffe liegen und eignen sich besonders für Anwendungen bei hohen Temperaturen (Turbinenbau). Zum Fügen der Aluminide sowohl artgleich als auch artfremd mit austenitischen oder warmfesten Stählen haben sich Nickelbasislote bewährt. Bei den Titanaluminiden (Ti<sub>46</sub>Al<sub>2</sub>NbCrMn, Ti<sub>48</sub>Al<sub>2</sub>Cr) erhält man hohe Scherfestigkeiten bei der Verwendung von Ni-Mn-Pd-Lot. Die Nickelaluminiden (NiAl) lassen sich gut mit Ni-Cr-Si-Lote fügen, /7/.

Für die form- und werkzeugfreie Fertigung von Bauteilen könnte die Löttechnik eine größere Bedeutung gewinnen. Nach einer vorausgegangen CAD – Modellierung wird mit einem rechnergestützten Laser Sintering Prozess ein 3-D Bauteil gefertigt, welches dann aus einem porösen metallischen Werkstoff besteht. Ergänzt man diesen Bauprozess anschließend durch ein Benetzen mit Lot, so werden die Poren geschlossen und man erhält ein funktionsfähiges Bauteil. Auch die Fertigung von Gradientwerkstoffen lässt sich auf diesem Wege realisieren.

#### 5 Zusammenfassung

Das Löten ist in der Luftfahrtindustrie zum Verbinden unterschiedlicher und schwer benetzbarer Werkstoffe ein etabliertes stoffschlüssiges Fügeverfahren. Die neuen Impulse, die aus den Gebieten der Ingenieurkeramiken und intermetallischen Verbindungen kommen, werden weitere Entwicklungen speziell im Hochtemperaturbereich bewirken, beispielsweise für effiziente Brennkammer- und Turbinenbaugruppen. Auf diese Entwicklungen darf man sicherlich gespannt sein.

#### 6 Literatur

- /1/ N., N.: Löten, Allgemeines, Begriffe, DIN 8505 T 1, Beuth Verlag, 1979
- /2/ Wittke, K.: Verfahren der Löttechnik – von der Antike bis ins Industriezeitalter, Jahrbuch Schweißtechnik '97, S. 247-265, DVS Verlag Düsseldorf, 1997
- /3/ N., N.: Hart- und hochtemperaturgelötete Bauteile, DIN 65169, Beuth Verlag, 1986
- /4/ Adam, P.: Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken, Birkhäuser Verlag, 1998
- /5/ Lugscheider, E.: Herstellungsmöglichkeiten von hochtemperaturbeständigen Verbunden nichtoxidischer Ingenieurkeramik mittels verschiedener Lotkonzepte, DVS Berichte, DVS-Verlag Düsseldorf, 1994
- /6/ Weise, W.; Malikowski, W.; Krappitz, H.: Verbinden von Keramik mit Keramik oder Metall durch Aktivloten unter Argon oder Vakuum, Degussa
- /7/ Lison, R.: Schweißen und Löten von Werkstoffen auf der Basis intermetallischer Phasen, Schweißen & Schneiden, S. 80-89, DVS-Verlag Düsseldorf, 2/2000