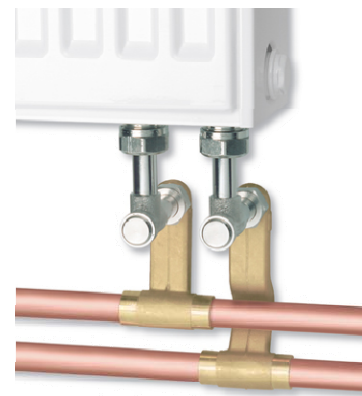
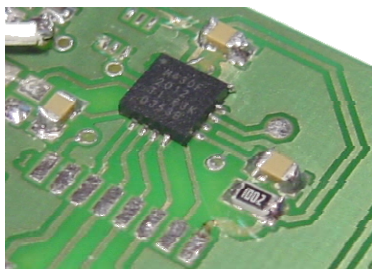
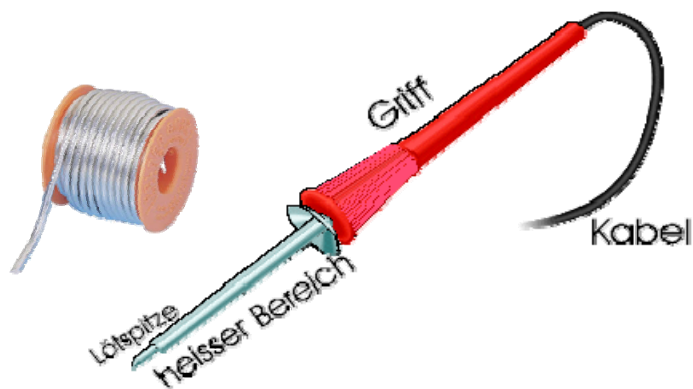


Kapitel 3: Lötverbindungen

(nach Roloff Matek Kapitel 5)

1	Einsatzgebiet.....	2
1.1	Funktion und Wirkung	2
1.2	Lötverfahren	2
1.3	Lötbarkeit der Materialien	3
1.4	Lotarten	3
1.5	Flussmittel	3
2	Gestaltung.....	4
2.1	Gestaltungsregeln	4
3	Berechnung.....	5
3.1	Beanspruchung	5
3.2	Scherfestigkeit	5
3.3	Zeitstands- und Dauerfestigkeit	5
3.4	Reduktion der Festigkeit durch Wärmeeinwirkung	5
3.5	Nachweis der Lötverbindung	6
3.5.1	Scherbeanspruchter Überlappungsstoss.....	6
3.5.2	Torsionsbeanspruchte Lötverbindung	6
4	Konstruktionsbeispiele	7
4.1	Kontakt an Autoscheibe	7
4.2	Muffenverbindung in Haustechnik.....	7
4.3	Leiterplatten	8
4.4	Platten - Wärmetauscher	8
4.5	Lichtbogenlöten von Feinblechen	9



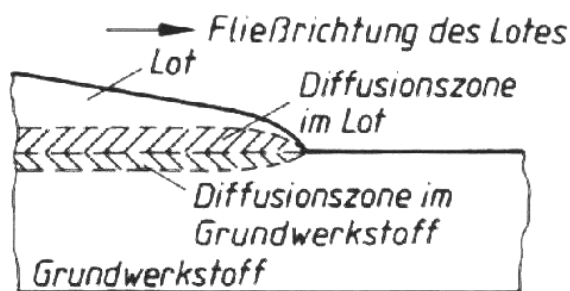
1 Einsatzgebiet

1.1 Funktion und Wirkung

Löten ist ein thermisches Verfahren zum stoffschlüssigen Fügen und Beschichten von Werkstoffen. Das Lot wird durch Verflüssigung verarbeitet. Die Arbeitstemperatur liegt unter der Schmelztemperatur der Grundwerkstoffe.

Es wird unterschieden zwischen:

- Weichlöten (Arbeitstemperatur unter 450 °C)
- Hartlöten (Arbeitstemperatur 450 ... 900 °C)
- Hochtemperaturlöten (Arbeitstemperatur über 900 °C)



Vorteile

- Verbindung von unterschiedlichen Metallen
- wenig thermische Beeinflussung des Werkstoffes (Weichlöten)
- Gute Dichteigenschaften (auch gasdicht)
- Gute elektrische Leitfähigkeit
- Keine Spannungsspitzen (Kerbwirkung)
- Vergleichbare Festigkeit wie die Grundwerkstoffe (Hartlöten, Hochtemperaturlöten)
- Keine Festigkeitsreduktion durch Alterung
- Automatisierbar

Nachteile

- Teures Lotmaterial bei grossflächigen Lötstellen (Zinn oder Silber)
- Schlecht anwendbar mit Aluminium (grosse Potentialdifferenz)
- Chemische Korrosion durch Flussmittelreste
- Festigkeit gering (Weichlöten)
- Aufwendige Vorbereitungsarbeiten

1.2 Lötverfahren

Das **Weichlöten** wird vorwiegend für dichtende und/oder elektrisch leitende Verbindungen angewendet. Die Weichlote sind Zinn oder Silber Legierungen mit Zusätzen wie Blei, Antimon oder Kupfer. Die Erwärmung der Lötstelle erfolgt hauptsächlich durch Heizkolben, Flammen oder im Ofen.

Das **Hartlöten** wird vorwiegend für Verbindungen angewendet die festigkeitsmässig belastet sind. Die Hartlote sind Kupfer, Silber, Nickel, Palladium oder Aluminium Legierungen mit Zusätzen wie Blei, Zinn, Silber oder anderen Stoffen. Die Erwärmung der Lötstelle erfolgt hauptsächlich durch Induktion oder Flammen.

Das **Hochtemperaturlöten** wird flussmittelfrei im Vakuum oder in einer Schutzgasatmosphäre durchgeführt.

1.3 Lötbarkeit der Materialien

Werkstoff	Schmelzpunkt ca. °C	Lötbarkeit		Lote	
		Weichlöten	Hartlöten	Weichlot	Hartlot
Stahl unlegiert	1520	mittel	gut	Sn	Ms, Ag
Stahl legiert	1200 ... 1600	gut	sehr gut	Sn, Zn/Cd	Cu, Ms, Ag
GJL, GJS	1250	schlecht	gut	Sn	Ms, Ag
Kupfer (Cu)	1083	Sehr gut	sehr gut	Sn, Pb, Zn	Ms, Ag
Cu Legierungen	600 ... 1100	Sehr gut	sehr gut	Sn	Ms, Ag
Aluminium (Al) Al Legierungen	660	schlecht	teilweise gut	Al/Sn, Al/Zn	Al-Hartlote, Speziallote
Hartmetall	bis 2800	-	gut	-	Cu, Ms, Ag

1.4 Lotarten

Weichlote:

Legierung	Anwendung
Zinn – Blei	<ul style="list-style-type: none"> Elektronik, Feinblech, hochlegierte Stähle (+Wismut), Kühlerbau (+Antimon) Luftfahrt (+Silber) Kabel (+Cadmium)
Zinn – Kupfer	<ul style="list-style-type: none"> Feinwerktechnik Kupferrohrinstallation (Heizung, Sanitär)
Zinn – Iridium	<ul style="list-style-type: none"> Glas – Metall Kombination

Hartlote:

Legierung	Anwendung
(CU) Kupfer	<ul style="list-style-type: none"> hohe Arbeitstemperatur hohe Festigkeit
(CP) Kupfer – Phosphor	<ul style="list-style-type: none"> Materialien der Wärme- u. Kältetechnik
(AG) Silber	<ul style="list-style-type: none"> hohe Warmfestigkeit gute Benetzung (automatisierbar)
(NI) Nickel und Kobalt	<ul style="list-style-type: none"> hohe Warmfestigkeit
(PD) Palladium	<ul style="list-style-type: none"> hohe Warmfestigkeit breite Werkstoffpalette
(AL) Aluminium	<ul style="list-style-type: none"> Aluminiumwerkstoffe gute Fugenfüllung

Hochtemperaturlote:

Legierung	Anwendung
(CU) Kupfer	<ul style="list-style-type: none"> hohe Arbeitstemperatur hohe Festigkeit
(AU) Gold	<ul style="list-style-type: none"> hohe Warmfestigkeit gute Benetzung (automatisierbar)
(NI) Nickel und Kobalt	<ul style="list-style-type: none"> hohe Warmfestigkeit (Turbinenschaufel)

1.5 Flussmittel

Als Flussmittel werden nicht metallische Stoffe als Pasten, Pulver oder Flüssigkeiten verwendet. Das Flussmittel verhindert die Oxidation der Lötstelle und ermöglicht es dem Lot in den Lötspalt einzudringen (Kapillarwirkung).

Das Flussmittel hat einen Schmelzpunkt der ca. 50 °C unterhalb dem Schmelzpunkt des Lotes ist.

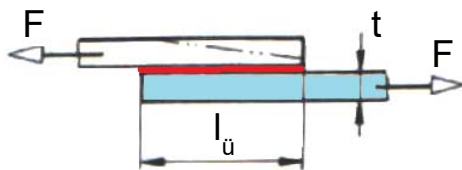
2 Gestaltung

2.1 Gestaltungsregeln

- 1) Die erforderliche Lötspaltbreite soll bei der Arbeitstemperatur erreicht werden. Im kalten Zustand ist somit der Spalt etwas kleiner.

Grundwerkstoff	Optimale Lötspaltbreite [mm]			
	Weichlote	Hartlote		
		Kupfer-Lote	Messing-Lote	Silber-Lote
Stahl unlegiert	0.05 ... 0.20	0.05 ... 0.15	0.10 ... 0.30	0.05 ... 0.02
Stahl legiert	0.10 ... 0.25	0.10 ... 0.20	0.10 ... 0.35	0.10 ... 0.25
Kupfer und Kupfer-Legierungen	0.05 ... 0.20	-	0.10 ... 0.25	0.05 ... 0.25
Hartmetall	-	0.30 ... 0.50	-	0.30 ... 0.50

- 2) Lötnahte möglichst auf Schub beanspruchen
- 3) Kerbwirkungen vermeiden (sanfte Übergänge)
- 4) Lötnahtoberfläche soll mit Rauheit $Ra \leq 12.5 \mu m$ ausgeführt werden.
- 5) Lötverbindung so konstruieren, dass Flussmittelreste beseitigt werden können.
- 6) Überlappungslänge $l_{\ddot{u}} = (3 \dots 6) \times \text{Materialdicke}$ genügt.



- 7) Lötflussgerechte Gestaltung:

ungünstig	günstig	
		Lötflussverhalten: - Flussweg so kurz wie möglich - Spalterweiterungen vermeiden
		Lotflussweg: - Halbierter Flussweg durch Depot - Rändelspalten begünstigen Fließen und erhöhen Festigkeit
		Flussmittel: - Lot fließt von innen nach aussen - Flussmittel kann entweichen durch Entlüftungsbohrung

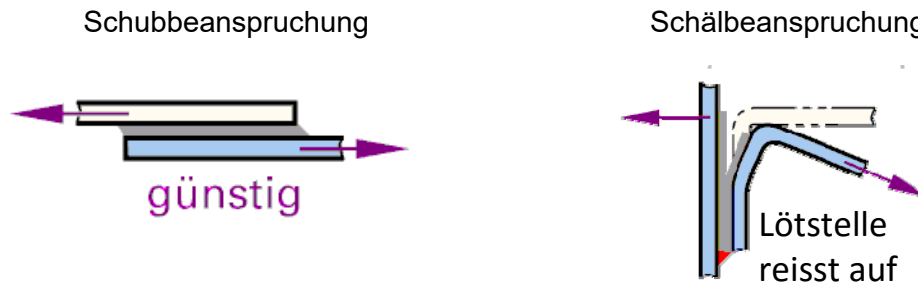
- 8) Entlastung der Lötstelle durch Formschluss:

ungünstig	günstig	
		Entlastung der Lötstelle: - Formschluss übernimmt Last - Lötstelle übernimmt Dichtfunktion

3 Berechnung

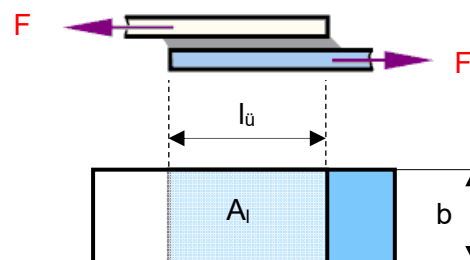
3.1 Beanspruchung

Lötverbindungen sind konstruktiv so zu gestalten, dass sie möglichst nur auf Scherung beansprucht werden. Ungünstig sind Zug-, Biege- und Schälbeanspruchungen.



3.2 Scherfestigkeit

Scherfestigkeit:
$$\tau_{IB} = \frac{F}{A_l} = \frac{F}{l_{\bar{u}} \cdot b}$$



Der Festigkeitswert τ_{IB} ist abhängig vom Lot, vom Grundwerkstoff und der Lötspaltbreite. Ist eine bestimmte Festigkeit erforderlich, wird dies durch Hartlöten oder Hochtemperaturlöten erreicht.

Richtwerte für Hartlötverbindungen sind im Roloff Matek TB 5-10 zu finden.

Größenordnung:	Weichlötverbindungen:	$\tau_{IB} = 20 \dots 35 \text{ N/mm}^2$
	Hartlötverbindungen:	$\tau_{IB} = 170 \dots 280 \text{ N/mm}^2$

3.3 Zeitstands- und Dauerfestigkeit

Bei Dauerbelastungen werden durch Kriechen die Weichlötverbindungen zerstört, da die Festigkeit bis auf 2 N/mm^2 sinken kann.

Hartlötverbindungen weisen bedeutend höhere Dauer-Festigkeitswerte auf.

Bei Dauerbelastung kann mit 30 N/mm^2 Wechselfestigkeit (Richtwert für Silberlot) auf Scherung und Torsion gerechnet werden.

3.4 Reduktion der Festigkeit durch Wärmeeinwirkung

Die Festigkeit der Lötverbindungen nehmen mit zunehmender Temperatur stark ab. Die entsprechenden Werte sind den Herstellerangaben zu entnehmen.

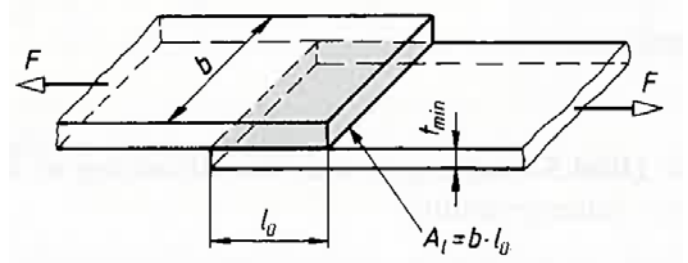
3.5 Nachweis der Lötverbindung

Zugbeanspruchte Lötverbindungen sind zu vermeiden. Der rechnerische Nachweis ist zwar möglich, jedoch nicht zweckmässig.

3.5.1 Scherbeanspruchter Überlappungsstoss

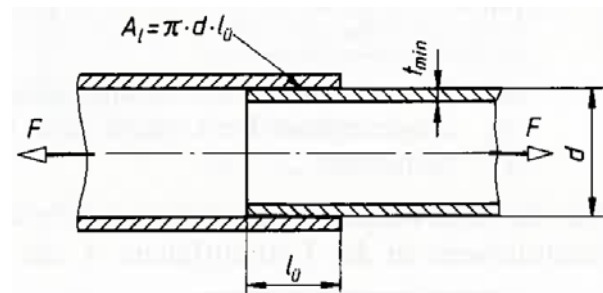
$$\tau_l = \frac{F}{A_l} = \frac{F}{b \cdot l_{\text{ü}}} \leq \frac{\tau_{\text{LB}}}{S}$$

- F: Scherkraft [N]
 b: Breite Lötfläche [mm]
 $l_{\text{ü}}$: Länge Lötfläche [mm]
 A_l : Lötfläche [mm²]
 S: Sicherheit: $S = 2 \dots 3$
 τ_K : Schubbelastung Lötstelle [N/mm²]
 τ_{LB} : Scherfestigkeit der Lötnaht [N/mm²]



Längsbelastetes Rohr:

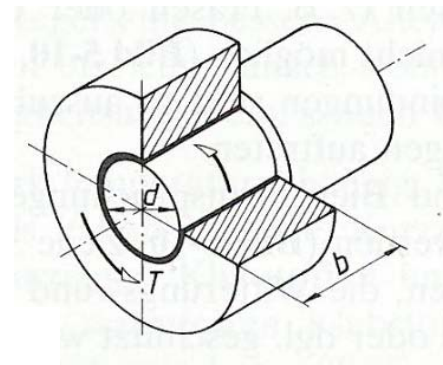
$$\tau_l = \frac{F}{A_l} = \frac{F}{\pi \cdot d \cdot l_{\text{ü}}} \leq \frac{\tau_{\text{LB}}}{S}$$



3.5.2 Torsionsbeanspruchte Lötverbindung

$$\tau_l = \frac{T}{r \cdot A_l} = \frac{2 \cdot T}{\pi \cdot d^2 \cdot b} \leq \frac{\tau_{\text{LB}}}{S}$$

- T: Drehmoment [Nmm]
 b: Breite Lötfläche [mm]
 d: Durchmesser Lötfläche [mm]
 r: Radius [mm]
 A_l : Lötfläche [mm²]
 S: Sicherheit: $S = 2 \dots 3$
 τ_l : Schubbelastung Lötstelle [N/mm²]
 τ_{LB} : Scherfestigkeit der Lötnaht [N/mm²]

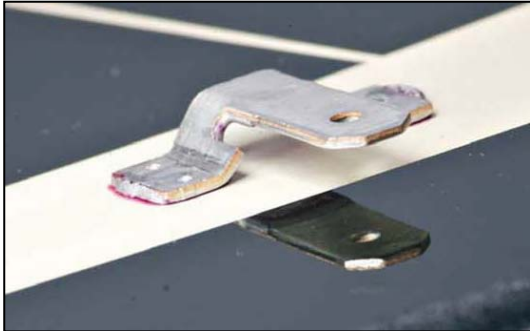


4 Konstruktionsbeispiele

4.1 Kontakt an Autoscheibe

Weichlöten:

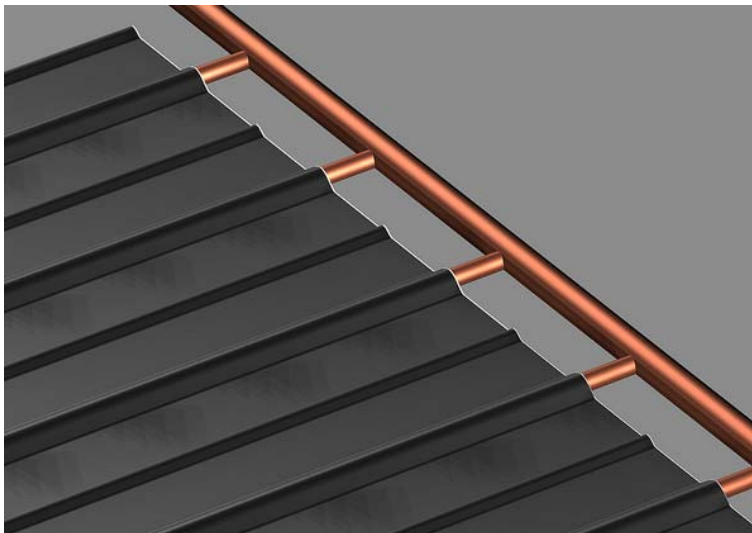
Lötung eines Anschlusskontaktes an der beheizbaren Rückscheibe.
Der Lötvorgang wird durch eine automatisierte Lötstation ausgeführt.



4.2 Muffenverbindung in Haustechnik

Weichlöten / Hartlöten:

Kupferrohre werden durch Muffenverbindungen dicht verlötet.
Die mechanischen Belastungen werden durch die Muffe aufgenommen.
Thermisch hoch belastete Verbindungen (z.B. bei Sonnenkollektoren) werden durch Hartlötung hergestellt.

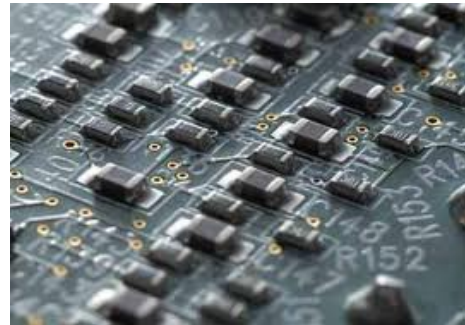


Kupfer - Fitting

4.3 Leiterplatten

Weichlöten:

Die Bauteile werden mit der Leiterplatte verlötet. Meist geschieht dies mit dem Wellen-Löten. Hauptzweck der Lötstelle ist die elektrische Verbindung zum Print und die mechanische Platzierung des Bauteils.



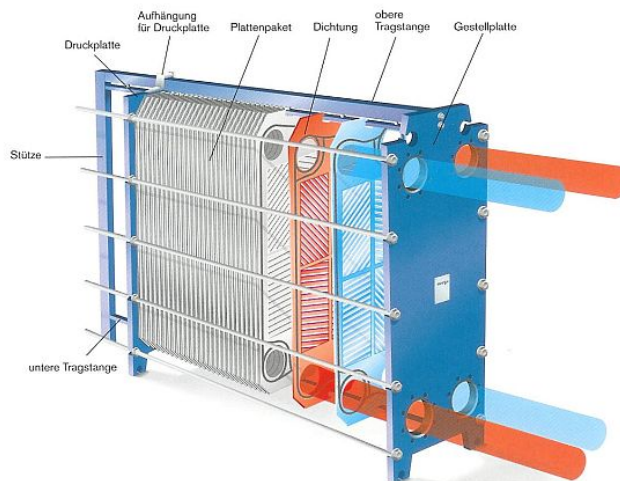
SMD - Bauteile

4.4 Platten - Wärmetauscher

Hartlöten:

Plattenwärmetauscher weisen eine grosse Wärmeübertragungsfläche mit einer kompakten Bauform auf.

Die grösseren Platten-WT sind meist geschraubt und die Platten sind mit Gummi-Dichtungen abgedichtet. Die geschraubten Platten-WT können zur Reinigung demontiert werden. Kleinere Platten-Wärmetauscher werden meist gelötet. Dadurch entsteht eine kostengünstige Bauweise, die absolut dicht ausgeführt werden kann (z.B. Wärmepumpen).



Platten – WT geschraubt



Platten – WT gelötet

4.5 Lichtbogenlöten von Feinblechen

Hochtemperaturlöten:

Durch die niedrige Schmelztemperatur des Lotes (910 bis 1040 °C) wird eine geringe Schädigung der Beschichtung, sowie eine geringe thermische Belastung der Bauteile erreicht. Die verwendeten Zusatzwerkstoffe sind weitgehend unempfindlich gegen Korrosion. Beim Lichtbogenlöten kommt es zu keiner wesentlichen Aufschmelzung des Grundwerkstoffes und es sind üblicherweise keine Flussmittel erforderlich. Vorteil ist der geringe Verzug, der geringe Energieaufwand sowie der geringe Lotverbrauch.



Lichtbogenlöten als Alternative zum Schweißen im Karosseriebau