

Löten von Kupfer und Kupferlegierungen



Deutsches
Kupferinstitut
Copper Alliance

1. Einleitung	4	5. Qualitätssicherung	47
2. Werkstofftechnische Grundlagen	9	6. Fallbeispiele	48
2.1. Grundlagen Kupferwerkstoffe	9	6.1. Heißverzinnung von Leiterplatten	48
2.2. Lote	10	6.2. Bandverzinnung	49
2.2.1. Weichlot	11	6.3. Herstellung von Wärmetauschern aus Kupfer	49
2.2.2. Hartlot	13	6.4. Herstellung von Hochleistungs-Kompakt-Wärmetauschern aus Kupfer	49
2.3. Löten von reinem Kupfer	16		
2.4. Löten von Kupferlegierungen	18	7. Begriffe	50
2.4.1. Niedriglegierte Kupferwerkstoffe	18		
2.4.2. Hochlegierte Kupferwerkstoffe	22	8. Anhang	51
3. Lötsicherheit	26	Quellenverzeichnis	57
4. Lötverfahren	29	Abbildungsverzeichnis	58
4.1. Lötprinzip	29	Tabellenverzeichnis	59
4.2. Oberflächenvorbereitung	30		
4.3. Oberflächenaktivierung	32		
4.3.1. Flussmittel	33		
4.3.2. Schutzatmosphäre	35		
4.4. Lotapplikation	36		
4.5. Verfahren	37		
4.5.1. Kolbenlöten	38		
4.5.2. Lötbadtauchlöten	38		
4.5.3. Flammlöten	40		
4.5.4. Ofenlöten	40		
4.5.5. Elektrisches Widerstandslöten	43		
4.5.6. Induktionslöten	44		
4.5.7. Elektronenstrahlöten	45		
4.5.8. Lichtbogenlöten	45		
4.5.9. Laserstrahlöten	46		

Abkürzungen

Nd:YAG-Laser	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat Laser
SMD	Surface Mounted Device (oberflächenmontiertes Bauelement)
PVD	Physical Vapour Deposition (Physikalische Dampfphasenabscheidung)
RoHS	Restriction of (the use of certain) Hazardous Substances (Beschränkung (der Verwendung bestimmter) gefährlicher Stoffe)
EG	Europäische Gemeinschaft
EU	Europäische Union
MIG	Metall-Inert-Gas
WIG	Wolfram-Inert-Gas

Chemische Elemente und Verbindungen

Ag	Silber
Al	Aluminium
Ar	Argon
Be	Beryllium
C	Kohlenstoff
CO₂	Kohlenstoffdioxid
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
H₂	Wasserstoff
H₂O	Wasser
HF	Fluorwasserstoffsäure
Mn	Mangan
Ni	Nickel
O₂	Sauerstoff
P	Phosphor
Pb	Blei
S	Schwefel
Sb	Antimon
Si	Silizium
Sn	Zinn
Te	Tellur
Zn	Zink
Zr	Zirkon

1. Einleitung

Kupfer ist ein Werkstoff, der bereits seit tausenden Jahren auf Grund seiner speziellen Eigenschaften vom Menschen genutzt wird. Da er auch in metallisch reiner Form (gediegen) vorkommt, wurde er schon früh wegen seiner guten Umformbarkeit und Farbe eingesetzt. Kupfer wurde damit zum ersten Gebrauchsmetall des Menschen.

Mit der zunehmenden Industrialisierung wurden außerdem noch andere Eigenschaften, z. B. die sehr gute elektrische und thermische Leitfähigkeit sowie die gute Beständigkeit gegen atmosphärische und vielfach auch chemische Einflüsse, wichtig. Kupfer kann mit vielen verschiedenen Metallen Legierungen bilden, so dass eine Vielzahl von Legierungssystemen vorhanden ist, bei denen bestimmte mechanisch-technologische Eigenschaften wie Härte, Zugfestigkeit, Dehngrenze, chemische Beständigkeit, Verschleißwiderstand und andere Eigenschaften gezielt beeinflusst werden können. Unter Berücksichtigung der besonderen physikalischen und mechanischen Eigenschaften sind viele Kupferwerkstoffe

gut lötlbar. In Abhängigkeit vom eingesetzten Werkstoff sind die entsprechenden Fertigungsparameter wie Lötverfahren, -zusätze sowie Vor- und Nachbehandlungen zu wählen. Die in Abbildung 1 dargestellten Einflussgrößen auf die Lötbarkeit müssen beachtet und aufeinander abgestimmt werden. Die Lötbarkeit eines Bauteils ist gegeben, wenn der vorgesehene Grundwerkstoff zum Löten geeignet ist, die Anwendbarkeit eines oder mehrerer Lötverfahren möglich ist, sowie die Lötteile lötgerecht und hinsichtlich der zu erwartenden Betriebsbedingungen so konstruiert sind, dass die Sicherheit des gelöteten Bauteils gegeben ist [1].

Die vorliegende Broschüre gibt den derzeitigen Stand der Technik in der industriellen Anwendung von Kupfer und seinen Legierungen wieder, erhebt jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Da die Forschungs- und Entwicklungsarbeit auf diesem Gebiet weitergeht, sollte sich bei Anfragen direkt an das Deutsche Kupferinstitut oder entsprechende Einrichtungen gewendet werden.

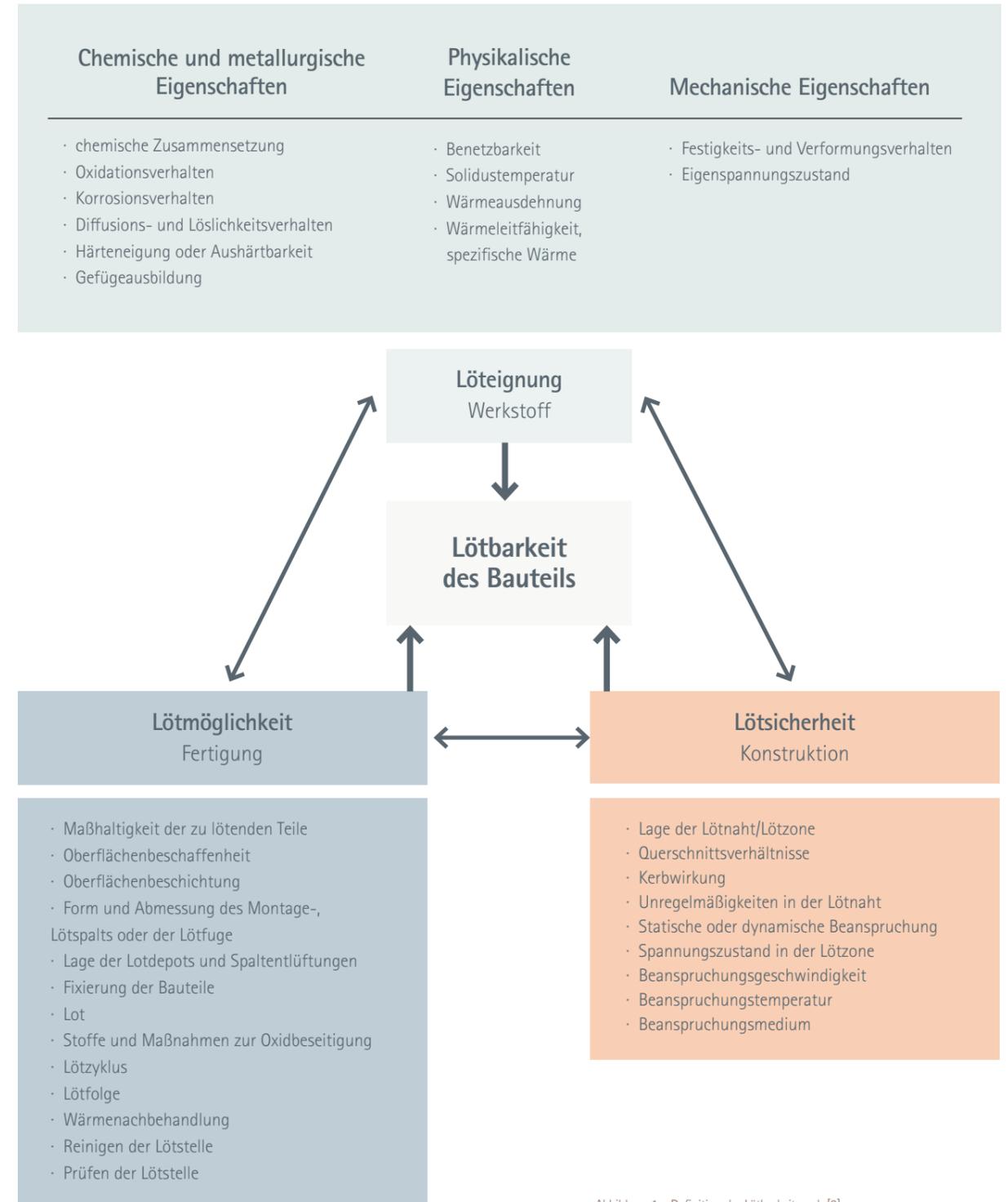


Abbildung 1 – Definition der Lötbarkeit nach [2]

Zwei wichtige thermische Fügeverfahren sind das Schweißen und das Löten. Da die entstandene Verbindung unabhängig vom Herstellungsverfahren die letztendlichen Bauteileigenschaften bestimmt, werden diese beiden Fügeverfahren nach [3] hinsichtlich der chemischen Bindung sowie der chemischen Zusammensetzung des Grundwerkstoffes (oder der Grundwerkstoffe) in Bezug auf den Zusatzwerkstoff unterteilt. Sowohl beim Schweißen als auch beim Löten entsteht eine metallische Bindung, jedoch gibt es bei der chemischen Zusammensetzung Unterschiede. Während eine Schweißverbindung aus Grundwerkstoffen mit gleicher chemischer Zusammensetzung und artgleichem Schweißgut besteht, besitzt eine Lötverbindung durch die Verwendung eines artfremden Zusatzwerkstoffes ein artfremdes Lötgut. Eine Lötverbindung besteht aus den verfahrensbeeinflussten Grundwerkstoffen, der Diffusions-/Übergangsphase und dem Lötgut. Sie wird unter Einwirkung von Wärme mit oder ohne Zusatzwerkstoff hergestellt.

Beim Löten wird der Grundwerkstoff nicht thermisch aufgeschmolzen. Unter Verwendung eines geschmolzenen Zusatzmetalls, des Lots, werden ggf. unter Anwendung von Flussmitteln und/oder mit Schutzgasen Werkstoffe gefügt [4].

[5] Einige Vorteile des Lötens im Gegensatz zu anderen Fügeverfahren sind:

- das Fügen verschiedenartiger Werkstoffe,
- die erhöhte Maß- und Formhaltigkeit der gelöteten Erzeugnisse durch den geringeren Wärmeeintrag,
- das Herstellen mehrerer Lötverbindungen an einem Werkstück in einem Vorgang,
- das Löten filigraner Bauteile ohne Beschädigung,
- die gute Wärme- und elektrische Leitfähigkeit der Lötverbindungen und
- der geringere Wärmeeintrag im Vergleich zum Schweißen, der zu geringeren Eigenspannungen im Bauteil führt.

Zu beachten sind beim Löten jedoch unter anderem die meist niedrigeren Festigkeiten der Lötverbindung im Vergleich zum Grundwerkstoff, ein unterschiedliches chemisches Potential von Grundwerkstoff und Lötgut, eine mögliche chemische Korrosionsgefahr durch Flussmittelreste sowie konstruktive Einschränkungen durch z. B. enge Lötspaltbreiten und geringe zulässige Gestaltabweichungen an der Fügestelle. Häufig sind umfangreiche Vorbehandlungs- bzw. Nachbehandlungsmaßnahmen notwendig, wie Entfetten, Beizen, Entfernen von Flussmittelrückständen usw. [6]. Eine erste Einteilung des Lötens erfolgt in DIN ISO 857-2 (2007) nach der Liquidustemperatur des Lotes in Weich- und Hartlöten. Beim Weichlöten liegt die Liquidustemperatur des Lotes unter 450 °C und beim Hartlöten über 450 °C. Bis zum Februar 2007 war das Hochtemperaturlöten (über 900 °C) in der Vorgängernorm (DIN 8505) definiert. Heute zählt dieser Fügeprozess zum Hartlöten.

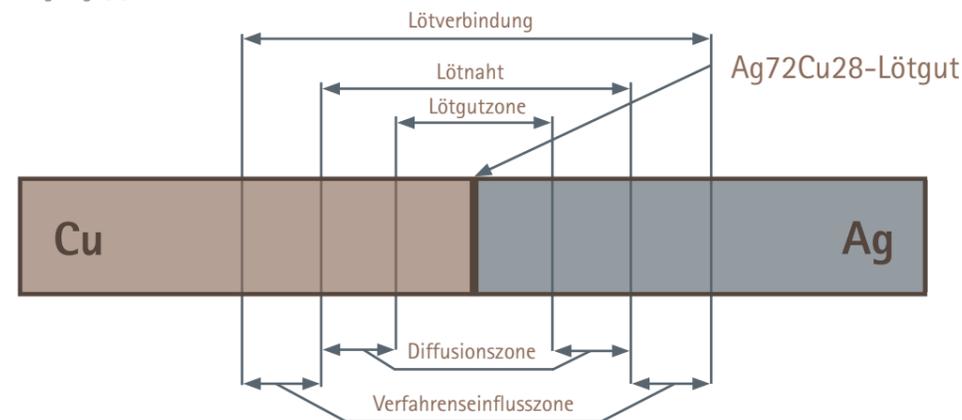
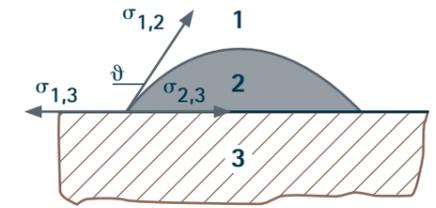


Abbildung 2 – Lötverbindung Kupfer-Silber ohne Zusatzwerkstoff

Der Lötprozess basiert auf physikalischen und chemischen Vorgängen. Grundlage zur Entstehung von Lötverbindungen sind Grenzflächenreaktionen und Diffusionsvorgänge flüssiger Lot- und fester Grundwerkstoffe. Der Lötmechanismus besteht aus folgenden Prozessschritten [7]:

1. Erwärmung der Bauteile,
2. Oberflächenaktivierung durch z. B. Flussmittel, Schutzgas,
3. Lotfließen und Benetzen, d. h. das Lot dringt im schmelzflüssigen Zustand in den Lötspalt ein oder breitet sich auf der Fläche aus,
4. Entstehung des Lötgutes durch Wechselwirkung zwischen flüssigem Lot und Grundwerkstoff,
5. Erstarrung des flüssigen Lötgutes.

Die Erwärmung der Bauteile erfolgt je nach Löttaufgabe unterschiedlich und dient zum Aufschmelzen des Lotes und ggf. des Flussmittels (siehe Kapitel 4.3). Die Flussmittel aktivieren die Oberfläche. Dabei muss eine blanke Oberfläche, frei von Ölen und anderen Oberflächenbelägen, geschaffen werden. Nur dann ist ein Benetzen der Oberfläche mit schmelzflüssigem Lot möglich. Hierbei sind auch das kapillare Verhalten des Lotes, Binde- und Diffusionsvorgänge zwischen flüssiger Phase und festem Grundwerkstoff von Bedeutung. In Abbildung 3 ist die Benetzung der Oberfläche mit dem Lot dargestellt. Der Benetzungswinkel ϑ beschreibt die Wechselwirkung zwischen den im Lötprozess vorliegenden Oberflächenspannungen $\sigma_{1,2}$ (gasförmige Phase 1), $\sigma_{1,3}$ (feste Phase 3) und $\sigma_{2,3}$ (flüssige Phase 2).



- Legende
- 1 gasförmige Umgebung
 - 2 schmelzflüssiges Lot
 - 3 Grundwerkstoff
 - ϑ Benetzungswinkel

- $\sigma_{1,2}$ Oberflächenspannung der Flüssigkeit an der Atmosphäre
- $\sigma_{1,3}$ Oberflächenspannung zwischen festem Körper und umgebender Atmosphäre
- $\sigma_{2,3}$ Oberflächenspannung der Flüssigkeit und Festkörper

Abbildung 3 – Benetzung einer metallischen Oberfläche mit Lot [7]

Vollständige Benetzung	Ausreichende Benetzung	Entnetzung
$\vartheta = 0^\circ$	$\vartheta \leq 30^\circ$	$\vartheta > 90^\circ$

Tabelle 1 – Zusammenhang zwischen Benetzungswinkel und Benetzung [7]

Je kleiner der Benetzungswinkel ist, desto besser ist die Benetzung. Dabei werden, wie in Tabelle 1 dargestellt, Bereiche vollständiger und ausreichender Benetzung sowie Entnetzung in Abhängigkeit des vorhandenen Benetzungswinkels festgelegt.

Nach dem Löten können Legierungselemente des Lotes im Grundwerkstoff und Legierungselemente des Grundwerkstoffes im Lot nachgewiesen werden. Diese Änderung der chemischen Zusammensetzung wird als Diffusion bezeichnet.

Obwohl der Grundwerkstoff nicht schmilzt, liegt im Benetzungsbereich eine Diffusionszone vor. Mindestens ein Legierungselement des Lotes bildet mit einem Legierungselement des Grundwerkstoffes einen Mischkristall, ein Eutektikum oder eine intermetallische Phase. Mit Hilfe von Zustandsdiagrammen kann vor dem Löten bestimmt werden, ob eine Diffusion zwischen den Metallpaarungen stattfindet. Die Diffusion ist zeit- und temperaturabhängig. Die Verweildauer bei Löttemperatur, besonders beim Hartlöten

sollte möglichst kurz sein, um ein starkes Anlagieren des Grundwerkstoffes oder die Bildung spröder Phasen in den Übergangszonen zu vermeiden. Um eine optimale Festigkeit der Lötverbindung zu erreichen, muss das Lot einige Sekunden im flüssigen Zustand sein, damit eine ausreichend tiefe Diffusionszone entsteht [1] [6] [9].

2. Werkstofftechnische Grundlagen

Abbildung 4 zeigt den Querschnitt einer lokal erwärmten Fügeverbindung. Der Grundwerkstoff wurde nur an der Lötstelle wärmebeeinflusst, wie z. B. beim Flammlöten. Dieser Vorgang kann zu einer erhöhten Eigenspannung im Bauteil führen. Das Ergebnis einer globalen Erwärmung wie beim Ofenlöten ist eine spannungs- und verzugsarm gelötete Baugruppe. Das komplette Bauteil wird gleichmäßig erwärmt und abgekühlt, d. h. der gesamte Grundwerkstoff ist verfahrensbeeinflusst. Vorteil dieser Methode ist die gleichzeitige Durchführung von Löten und einer eventuellen Wärmebehandlung, wie z. B. Aushärten.

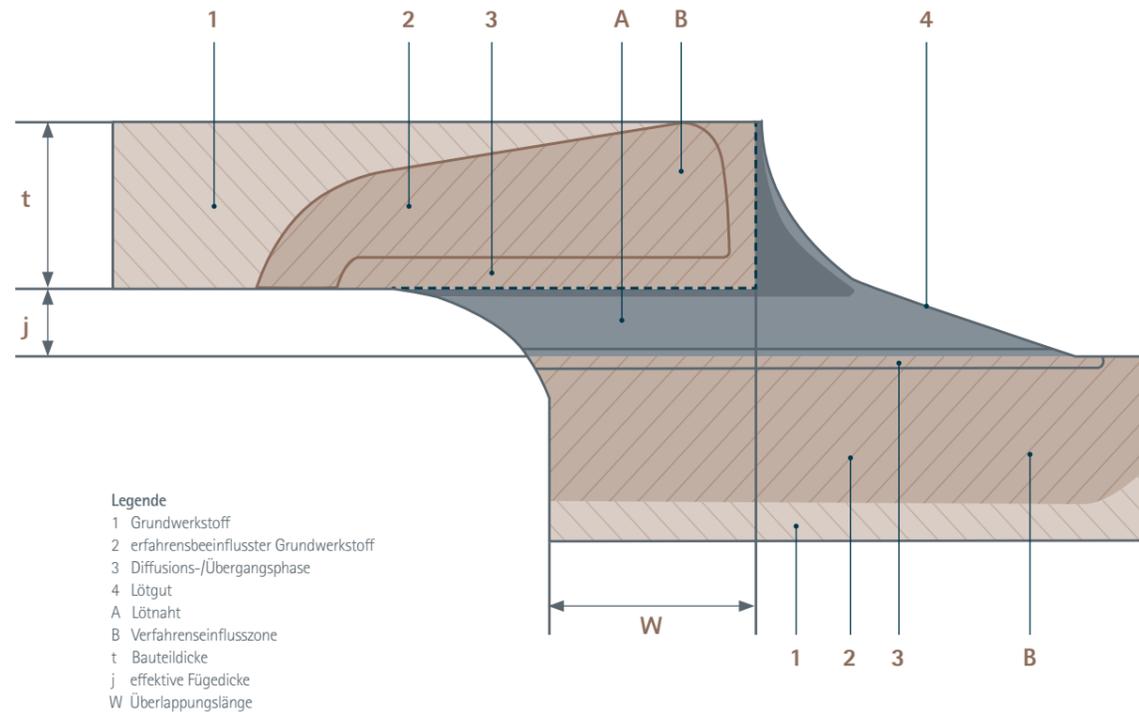


Abbildung 4 - Schema einer gelöteten Fügeverbindung nach [10]

2.1 Grundlagen Kupferwerkstoffe

Kupfer hat eine Dichte von $8,94 \text{ kg/dm}^3$ und gehört zu den Nichteisen-Metallen. Aufgrund der kubischflächenzentrierten (kfz) Gitterstruktur verfügt es über eine sehr gute Tieftemperaturzähigkeit und Kaltverformbarkeit. Durch eine Umformung im kalten Zustand wird eine Festigkeitssteigerung erzielt. Des Weiteren hat Kupfer eine hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit (Verhältnis elektrischer zu thermischer Leitfähigkeit konstant) und verfügt über eine gute Korrosionsbeständigkeit gegenüber einer Vielzahl von Medien.

Kupferlegierungen werden nach dem Behandlungszustand in:

- **ausscheidungshärtende Werkstoffe** (z. B. CuBe-Legierungen) und
- **kaltverfestigte Werkstoffe**, beziehungsweise nach der Werkstoffzusammensetzung in:
 - **einphasige Werkstoffe** (z. B. reines Cu) beziehungsweise Legierungen, die vollständig aus Mischkristallen bestehen (z. B. CuNi-Legierungen, einphasiges Messing) und
 - **mehrphasige Werkstoffe** (z. B. zweiphasiges Messing) unterteilt [11].

Kupferlegierungen werden in Gussstücke, Knetlegierungen (z. B. Band, Draht, Rohre, Schmiedestücke) und Sinterteile unterschieden. Zu den bekanntesten Kupferlegierungen gehören Messing (Kupfer-Zink-Legierung) und Bronze (Kupfer-Zinn-Legierung), aber auch Legierungen mit Nickel, Mangan, Aluminium, Eisen, Beryllium, Chrom und Silizium. Es ist zu erwähnen, dass die Begriffe „Messing“, „Bronze“, „Rotguss“ und „Neusilber“ nicht genormt und nur marktüblich verwendet werden.

Werkstoffgruppe	Ausdehnungskoeffizient $10^{-6}/\text{K}$	elektrische Leitfähigkeit [MS/m]	Wärmeleitfähigkeit bei 20° C $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	0,2 %-Dehngrenze $R_{p0,2}$ ungefähr N/mm^2	Zugfestigkeit R_m min. N/mm^2	Bruchdehnung A min. %
Cu	17,0	59,1	393	40 ... 90	200 ... 360	max. 42
CuZn	18,0 ... 20,5	15,0 ... 33,3	117 ... 243	60 ... 500	230 ... 560	4 ... 50
CuNiZn	16,5 ... 19,5	3,0 ... 5,0	27 ... 35	220 ... 660	360 ... 800	8 ... 45
CuSn	17,1 ... 18,5	8,7 ... 11,5	62 ... 84	140 ... 1000	360 ... 1000	30 ... 65
CuNi	14,5 ... 17,6	2,04 ... 6,4	21 ... 48	90 ... 520	290 ... 650	10 ... 40
CuAl	17,0 ... 18,0	5,0 ... 10,0	40 ... 83	110 ... 680	350 ... 830	5 ... 50
Stahl, unlegiert	12,0	5,5 ... 7,0	48 ... 58	175 ... 355	290 ... 630	18 ... 26

Weitere ergänzende Informationen zu den einzelnen Werkstoffen können 1) den DIN-Taschenbüchern 456-2 und 3 2) den jeweiligen Werkstoffdatenblättern des Deutschen Kupferinstituts entnommen werden (www.kupferinstitut.de)

Tabelle 2 - Vergleich der physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Kupfer, wichtigen Kupferlegierungen und unlegiertem Stahl

2.2 Lote

Kupfer lässt sich mit vielen verschiedenen metallischen Elementen legieren. Es wird als Halbzeug und Lot verwendet. Das Lot kann in Form von Draht, Band, Formteil (siehe Abbildung 5), Pulver, Paste usw. vorliegen.

Kupferbasislote zeichnen sich z. B. besonders durch ihr gutes Fließverhalten, gutes Spaltfüllungsvermögen und gute Duktilität aus.



Abbildung 5 – Lotformteile [11]

Anhand der Liquidustemperatur erfolgt eine Einteilung in Weich- oder Hartlot. Für eine geeignete Lotauswahl stehen einige Kriterien zur Verfügung z. B.:

- Art und Behandlungszustand des Grundwerkstoffes,
- Abmessungen und Herstelltoleranzen des Werkstückes,
- Belastungen an der Fügestelle,
- Betriebstemperaturen und -drücke,
- Umgebungsbedingungen an der Lötverbindung (z. B. angreifende Medien),
- Wirtschaftlichkeit,
- Arbeitssicherheit und
- Lötprozess. [6]

Mit Hilfe von Zustandsdiagrammen können Temperaturen (Schmelzpunkte, eutektische Temperatur), die Löslichkeit der Elemente ineinander, auftretende Phasen (Mischkristall, eutektische Phasen) ermittelt werden. Wichtig ist hierbei, dass die Zustandsdiagramme nur für Gleichgewichtsbedingungen gelten. In Abbildung 6 ist das Zustandsdiagramm für das Zweistoffsystem Silber-Kupfer dargestellt. In dem Zustandsdiagramm sind verschiedene Phasenfelder eingetragen, die durch Trennlinien voneinander abgegrenzt sind. Wichtige Trennlinien sind dabei die Liquidus- (flüssig) und Soliduslinie (fest). Die Liquiduslinie trennt das Gebiet der homogenen Schmelze (darüber, Bezeichnung L) und das Gebiet des flüssig-festen Zustandes (darunter). Die Soliduslinie grenzt die feste Phase von der flüssig-festen Phase ab. Im Zustandsdiagramm Kupfer-Silber gibt es zudem bei einer

bestimmten chemischen Zusammensetzung (72 % Silber, 28 % Kupfer) einen sog. eutektischen Punkt. Die eutektische Legierung erstarrt dabei wie ein reines Metall, d. h. es gibt keine Solidus- und Liquidustemperatur, die Schmelze geht schlagartig in den festen Zustand über. Die Erstarrung bei 780 °C liegt dabei deutlich unter der Erstarrungstemperatur der reinen Legierungselemente. Zahlreiche Kristallkeime bilden sich und behindern sich gegenseitig, so dass ein feines gleichmäßiges Gefüge mit guten mechanischen Eigenschaften entsteht. Aus diesem Grund werden in der Technik häufig eutektische Legierungen, wie z. B. Ag72Cu28, eingesetzt [13].

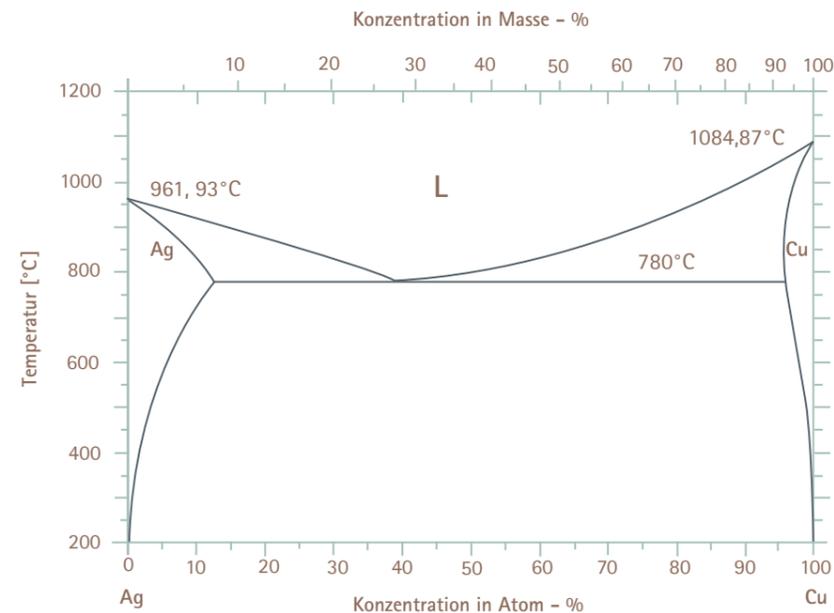


Abbildung 6 – Zustandsdiagramm Silber-Kupfer nach [14]

2.2.1. Weichlot

Die Löttemperatur für Weichlote liegt unter 450 °C. Aufgrund der geringen Festigkeit dieser Lote und der entsprechenden Lötverbindung eignen sie sich für geringe mechanische Belastungen und werden meist in der Elektrotechnik eingesetzt. Für die Auswahl der Weichlote stehen die DIN EN ISO 9453 (2014) bzw. 1707-100 (2011) zur Verfügung.

Für Lötungen von Kupferrohren wurden in der Vergangenheit oftmals bleihaltige Lote verwendet. Blei verbessert die Fließeigenschaften des Lotes und sorgt für glänzende glatte Oberflächen. Außerdem führt Blei zu niedrigeren Verarbeitungstemperaturen. Blei ist jedoch umweltschädlich und krebserregend. Deshalb existiert seit dem 01.07.2006 die RoHS DIR 2002/95/EG – Richtlinie des europäischen Parlaments und Rats „zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten“ (ersetzt durch 2011/65/EU von 2011), welche bleihaltige Lote verbietet. Gegenwärtig existieren noch Ausnahmen für den Einsatz hochbleihaltiger Weichlote, z. B. in der Medizin-, Sicherheits-, Luft- und Raumfahrttechnik. Alternativ werden in der Elektroindustrie häufig bleifreie Zinnlote angewandt. Bei diesen besteht oft die Gefahr der Whiskerbildung auf der Metalloberfläche. Whisker sind nadelför-

mige Einkristalle (Durchmesser ca. 1 µm und mehrere Millimeter lang), welche z. B. bei Stromfluss Kurzschlüsse verursachen können und somit das Bauteil schädigen. Das Wachstum dieser Kristalle erfolgt sehr langsam, so dass diese erst nach Jahren auftreten können. Mögliche Ursachen dafür sind Schichtteigenspannungen durch organische Einschlüsse/Verunreinigungen und mechanische Beanspruchung bei der Verarbeitung verzinnter Materialien. Bleifreie Alternativen für Weichlote sind Zinn-Kupfer-, Zinn-Silber- und Zinn-Kupfer-Silber-Legierungen. Es ist zu berücksichtigen, dass sich mit steigendem Silberanteil die Kosten des Weichlotes erhöhen. Für die Trinkwasserinstallation sind nach DVGW Arbeitsblatt GW 2 die bleifreien Weichlote Sn97Ag3 und Sn97Cu3 vorgeschrieben. Antimonfreie Lote werden für das Feinlöten und antimonhaltige/-arme für Groblötungen genutzt, z. B. im Kühlerbau, der Elektroindustrie oder bei Klempnerarbeiten. Weichlote auf Zink- und Cadmiumbasis werden in geringerem Maße angewandt. Cadmiumhaltige Weichlote sind, im Gegensatz zu Hartloten, bisher noch nicht verboten. Es sind jedoch z. B. die Unfallverhütungsvorschriften der Berufsgenossenschaften zu beachten, da Cadmium als gesundheitsgefährdend gilt [15].

Gruppe	Legierungskurzzeichen nach		Schmelztemperatur (Solidus/ Liquidus) in °C	mittlere chem. Zusammensetzung			bevorzugte Lötverfahren				einige Hinweise auf die Verwendung		
	DIN EN ISO 9453 (2014)	DIN 1707-100 Teil 100 (2011)		Sn	Pb	Cu	F	I	K	T			
Weichlote mit Kupfer	Sn50Pb49Cu1 (162)	-	183/ 215	50	Rest	1,4				X		Elektrotechnik, Elektronik	
	-	S-Sn60Pb40Cu	183/190	60	Rest	0,15					X	Elektrotechnik, Elektronik gedruckte Schaltungen	
	Sn60Pb39Cu1 (161)	-	183/190	60	Rest	1,4				X	X	Kupferrohr-Installation, Metallwaren	
	Sn97Cu3 (402)	-	227/310	Rest	0,07	3	X	X	X	X			
Weichlote mit Silber	-	S-Sn50Pb46Ag4	178/210	50	Rest	3,5					X	X	Elektrotechnik, Elektronik gedruckte Schaltungen
	-	S-Sn63Pb35Ag2	178	63	Rest	1,4				X	X	X	
	Sn96,3Ag3,7 (701)	-	221/228	Rest	0,07	3,7	X	X	X	X			Kupferrohr-Installation, Elektrotechnik
	Sn97Ag3 (702)	-	221/224	Rest	0,07	3	X	X	X	X			
	-	S-Cd82Zn16Ag2	270/280	2	Rest	16	X			X			
	-	S-Cd73Zn22Ag5	270/310	5	Rest	22	X			X			Elektrotechnik, Elektromotoren
	-	S-Cd68Zn22Ag10	270/380	10	Rest	22	X			X			
	Pb98Ag2 (181)	-	304/305	2,5	Rest	Sn 0,25	X			X			Elektrotechnik, Elektromotoren
	Pb95Ag5 (182)	-	304/370	5,5	Rest	Sn 0,25	X			X			für hohe Betriebstemperatur
	-	S-Pb95Sn3Ag2	304/310	1,75	Rest	Sn 2,0	X			X			Elektrotechnik, Elek- tromotoren
Weichlote mit Phosphor	-	S-Cd95Ag5	340/395	5	Rest	Cd	X						für hohe Betriebstemperatur
	-	S-Pb50Sn50P	183/215	50	Rest	P						X	Elektronik, gedruckte Schaltungen,
	-	S-Sn60Pb40P	183/190	60	Rest							X	insbesondere beim Schlepp-, Schwall- und Tauchlöten
	-	S-Sn63Pb37P	183	63	Rest							X	
Sonstige Weichlote	-	S-Sn60Pb40CuP	183/90	60	Rest							X	
	Sn50Pb32Cd18 (151)	-	145	50	Rest	Cd18	X	X	X	X			Fein- und Kabellötungen
	-	S-Sn80Cd20	180/195	Rest	0,05	Cd20		X	X	X			Elektrotechnik
	Sn95Sb5 (201)	-	235/240	Rest	0,07	Sb 5	X		X	X			Kälteindustrie

F- Flammlöten; I-Induktionslöten; K-Kolbenlöten; T-Tauchlöten

Tabelle 3 - Weichlote nach DIN EN ISO 9453 (2014) und DIN 1707-100 (2011) für Kupfer und Kupferlegierungen

2.2.2. Hartlot

Hartlote zum Löten von Kupferwerkstoffen sind meist Legierungen auf Kupfer-, Silber- oder Messingbasis und eignen sich für mechanisch stärker beanspruchte Verbindungen. Die Verarbeitungstemperaturen liegen zwischen ca. 500 – 1000 °C. In DIN EN ISO 17672 (2010) sind alle Hartlote in Gruppen aufgeschlüsselt. Für das Hartlöten von Kupfer sind die Gruppen Kupfer, Kupfer-Phosphor, Silber und Gold geeignet.

Für Lötungen von Reinkupfer und höherschmelzenden Kupferlegierungen empfehlen sich Kupfer-Zink-Lote. Steigende Zinkzusätze bis etwa 40 % reduzieren die Schmelztemperatur, bewirken aber eine Zunahme der Festigkeit, weshalb sogenannte Messinglote einen solchen Zinkgehalt aufweisen. Zur Verhinderung von porösen Lötstellen, die auf Zinkverdampfung und Wasserstoffaufnahme zurückzuführen sind, werden meist 0,1 bis 0,2 % Silizium zulegiert. Beim Flammlöten erfolgt die Lötung z. B. mit schwach oxidierender, nicht zu intensiver Flamme [16].

Phosphor zeigt als Legierungselement im Kupfer eine geringe Löslichkeit und liegt hauptsächlich im Kupferphosphid (Cu₃P) in intermetallisch gebundener Form vor. Die mechanischen Eigenschaften der Kupfer-Phosphor-Lote werden durch den Phosphorgehalt und die damit verbundene Ausscheidung von Cu₃P-Phasen aufgrund Gehalt, Größe, Form und Anordnung der Partikel bestimmt. Eine Kaltumformung ist bei Lötungen mit einem Phosphorgehalt über 7 % nicht mehr möglich. Ab etwa 300 °C dagegen weisen alle Phosphorlote eine sehr gute Umformbarkeit auf. Lote mit einem großen Schmelzbereich, wie z. B. CuP 179, können für größere Spalte eingesetzt werden. Phosphorlote sind auf Kupferoberflächen, bedingt auch z. B. auf Bronze (CuSn6), selbstfließend und können ohne Flussmittel verarbeitet werden, da Phosphor desoxidierend wirkt. Der Grund dafür ist, dass unter Temperatureinfluss das im Kupfer enthaltene Phosphor mit dem Luftsauerstoff zu Phosphorpentoxid reagiert. Dieses Phosphorpentoxid geht eine Reaktion mit der aus Cu(I)-oxid und Cu(II)-oxid bestehenden Oxidschicht des Kupfers zu Kupfermetaphosphat ein. Diese

Reaktion bewirkt, dass die Oxidschicht reduziert wird und die Kupferoberfläche benetzbar ist. Beim Löten von Gas- und Trinkwasserleitungen kommen silberhaltige und Kupfer-Phosphor-Hartlote mit DVGW- und/oder RAL-Gütezeichen zum Einsatz. Silberhartlote weisen z. B. niedrige Schmelztemperaturen, gute Benetzbarkeit und ausreichende Korrosionsbeständigkeit in verschiedenen Medien auf. Silber-Kupfer-Phosphor-Lote eignen sich besonders für das Löten von Kupfer, Rotguss, Kupfer-Zinn- und Kupfer-Zink-Legierungen. Bis zum Jahr 2011 wurden Hartlote mit Cadmiumzusätzen versetzt, um die Schmelztemperaturen weiter abzusenken. Seit Dezember 2011 ist jedoch die Verwendung von cadmiumhaltigen Hartloten in der EU verboten (EU Verordnung 494/2011). Sie dürfen nur aus Sicherheitsgründen und für Verteidigungs- sowie Luft- und Raumfahrtanwendungen eingesetzt werden.

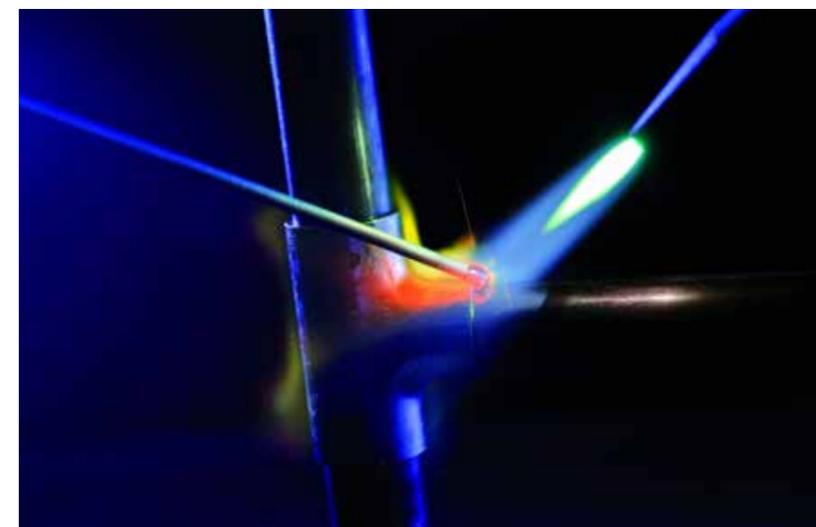


Abbildung 7
Flammlöten einer Kupferrohrverbindung [12]

Bezeichnung nach			Mittlere Zusammensetzung Massenteile in %	Schmelzbereich in °C Löttemperatur in °C		Hinweise für die Verwendung		
DIN EN ISO 17672 (2010)	DIN EN 1044 (1999; Vorgängernorm)	DIN EN ISO 3677 (1995)		Sol.	Liq.	Grundwerkstoff	Form der Lötstelle	Art der Lotzuführung
Kupferhartlote			Cu-Zn-Legierungen					
Cu 470a	Cu 301	B-Cu60Zn (Si)-875/895	60Cu; 0,3Si; Rest Zn	875	895	Kupfer u. Kupferlegierungen mit Schmelztemperatur über 950 °C (Solidus)	Spalt u. Fuge	angesetzt u. eingelegt
Cu 471*1	Cu 304*2	B-Cu60Zn(Sn)(Si)(Mn)-870/890	58*1 Cu/ 60*2 Cu; 0,175*1 Si/0,275*2 Si; 0,35Sn; 0,15Mn; Rest Zn	870	900		Spalt u. Fuge	
Kupfer-Phosphorhartlote			CuP-Legierungen					
CuP 182	CP 201	B-Cu92P-710/770	Rest Cu; 7,8 P	710	770	Vorzugsweise Kupfer, Rotguß, Kupfer-Zink-Legierungen, Kupfer-Zinn-Legierungen	Spalt	angesetzt u. eingelegt
CuP 180	CP 202	B-Cu93P-710/820	Rest Cu; 7P	710	820			
CuP 179	CP 203	B-Cu94P-710/890	Rest Cu; 6,2P	710	890			
Kupfer-Phosphorhartlote			Ag-CuP-Legierungen					
CuP 284	CP 102	B-Cu80AgP-645/800	15Ag; 5P; Rest Cu	645	800	Kupfer, Rotguß, Kupfer-Zink-Legierungen, Kupfer-Zinn-Legierungen	Spalt	angesetzt u. eingelegt
CuP 281	CP 104	B-Cu89AgP-645/815	5Ag; 6P; Rest Cu	645	815		Spalt u. Fuge	
CuP 279	CP 105	B-Cu92AgP-645/825	2Ag; 6,3P; Rest Cu	645	825			
Silberhartlote			Ag-Cu-Zn-Legierungen					
Ag 212	AG 207	B-Cu48ZnAg(Si)-800/830	12Ag; 48Cu; 40Zn; 0,15Si	800	830	Kupfer u. Kupferlegierungen	Spalt	angesetzt u. eingelegt
Ag 205	AG 208	B-Cu55ZnAg(Si)-820/870	5Ag; 55Cu; 40Zn; 0,15Si	820	870		Spalt u. Fuge	

Tabelle 4 - Auswahl an Hartloten für Kupfer und Kupferlegierungen auf Kupferbasis

Bezeichnung nach			Mittlere Zusammensetzung Massenteile in %	Schmelzbereich in °C		Hinweise für die Verwendung		
DIN EN ISO 17672 (2010)	DIN EN 1044 (1999; Vorgängernorm)	DIN EN ISO 3677 (1995)		Sol.	Liq.	Grundwerkstoff	Form der Lötstelle	Art der Lotzuführung
Ag-Cu-Zn-Sn-Legierungen			Kupferlegierungen					
Ag 156	AG102	B-Ag56CuZnSn-620/655	56Ag; 22Cu; 17Zn; 5Sn	620	655		Spalt	angesetzt und eingelegt
Ag 145	AG 104	B-Ag45CuZnSn-640/680	45Ag; 27Cu; 2,5Sn; 25,5Zn	640	680			
Ag 140	AG 105	B-Ag40CuZnSn-650/710	40Ag; 30Cu; 2Sn; 28Zn	650	710			
Ag134	AG 106	B-Cu36AgZnSn-630/730	34Ag; 36Cu; 2,5Sn; 27,5Zn	630	730			
Ag 130	AG 107	B-Cu36ZnAgSn-665/755	30Ag; 36Cu; 2Sn; 32Zn	665	755	Kupfer und Kupferlegierungen		
Ag 125	AG 108	B-Cu40ZnAgSn-680/760	25Ag; 40Cu; 2Sn; 33Zn	680	760			
Ag 244	AG 203	B-Ag44CuZn-675/735	44Ag; 30Cu; 26Zn	675	735			
Ag 230	AG 204	B-Cu38ZnAg-680/765	30Ag; 38Cu; 32Zn	680	765			
Ag 225	AG 205	B-Cu40ZnAg-700/790	25Ag; 40Cu; 35Zn	700	790			
Silber-Kupfer-Zink-Nickel-Mangan-Legierung			Ag-Cu-Zn-Ni-Mn-Legierung					
Ag 450		B-Ag50CuZnNi-660/705 50Ag; 20 Cu; 28Zn		660	750	Kupferlegierungen	Spalt	angesetzt und eingelegt
Zinkfreie Legierung			Ag-Cu-Ligierung (Zinkfrei)					
Ag 272	AG 401	B-Ag-72Cu-780	72Ag; 28Cu	780	780	Kupfer und Kupferlegierungen	Spalt	eingelegt

Tabelle 5 - Auswahl an Silberloten mit mehr als 20 % Silber für Kupfer und Kupferlegierungen

2.3. Löten von reinem Kupfer

Kupfer kann sehr gut weich- und hartgelötet werden. Es ist darauf zu achten, dass die zu lötenden Fügeflächen mechanisch oder chemisch vorbehandelt wurden, um die Oxidschicht zu entfernen. Eine Reinigung erfolgt meist durch Isopropanol, Ethanol, Aceton, wässrige Reiniger und Salpetersäure. Der Lötprozess oder die Verzinnung sollte gleich im Anschluss an die Oberflächenvorbereitung durchgeführt werden. In Tabelle 6 werden ausgewählte Kupfersorten aufgezeigt, welche gut bis sehr gut zum Löten geeignet sind.

Kurzzeichen	Werkstoffnummer	Zusammensetzung [%]			Löteignung	Verwendung
		Cu min.	O max.	P		
Sauerstoffhaltiges Kupfer						
Cu-ETP	CW004A	99,9	0,04	-	Weichlöten: sehr gut; Hartlöten: gut (nicht für Flammlöten)	Elektrotechnik
Desoxidiertes Kupfer (mit Phosphor), Sauerstofffrei						
Cu-HCP	CW021A	99,95	-	0,002- 0,007	Weichlöten: sehr gut; Hartlöten: sehr gut	Elektrotechnik, Plattierstoff
Cu-DHP	CW024A	99,90	-	0,015- 0,040	Weichlöten: sehr gut; Hartlöten: sehr gut	Bauwesen, Rohrleitung
Sauerstofffreies Kupfer, nicht desoxidiert						
Cu-OFE	CW009A	99,99	-	-	Weichlöten: sehr gut; Hartlöten: sehr gut	Vakuumtechnik, Elektronik

Weitere vollständige Informationen zu den einzelnen Werkstoffen können 1) der DIN CEN/TS 13388 und 2) den jeweiligen Werkstoffdatenblättern des Deutschen Kupferinstituts entnommen werden (www.kupferinstitut.de)

Tabelle 6 – ausgewählte Kupfersorten

Weichlöten

Ein großes Anwendungsgebiet für das Weichlöten von Kupfer ist die Elektronik. Dort werden besonders Zinnbasislote nach DIN EN ISO 9453 (2014) bzw. DIN 1707-100 (2011) eingesetzt. In der Elektrotechnik/Elektronik werden hauptsächlich bleifreie Lote benutzt. Bleihaltige Lote dürfen nur noch in Ausnahmefällen eingesetzt werden, die als Anhang der „Richtlinie 2011/65/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 08. Juni 2011 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten“ (RoHS) aufgeführt sind.

Teile von Elektromotoren, die im Betrieb höheren Temperaturen ausgesetzt sind, sollten bevorzugt mit bleifreien Weichloten höherer Solidustemperatur gelötet werden. Lötstellen mit diesen Loten weisen meist etwas höhere Scherfestigkeiten auf als Zinn-Blei-Lote. Hier liegen die Scherfestigkeitswerte der überlappenden Lötstellen im Kurzzeitversuch bei etwa 20 N/mm². Bei der Lötung von Trinkwasserleitungen (siehe auch DVGW Arbeitsblatt GW 2) oder Lötstellen, die tiefen Temperaturen ausgesetzt sind, wie z. B. in der Kälteindustrie, ist ebenfalls bevorzugt mit bleifreien Weichloten zu arbeiten. Teilweise

ist die Festigkeit weichgelöteter überlappender Rohrverbindungen höher als bei hartgelöteten Verbindungen, denn die Festigkeit des Kupferwerkstoffes kann durch das Hartlöten verringert werden. Für höhere Temperaturbelastungen sind warmfeste, bleifreie Weichlote einzusetzen. Diese können Dauertemperaturen bis 120 °C ohne Beeinträchtigung standhalten. Guss-Kupfersorten nach DIN EN 1982 (2008) lassen sich ähnlich wie Knet-Kupfersorten einwandfrei weichlöten.

Bezeichnung	Lotbeispiel	Anwendungsbeispiel	Flussmittel
Antimonhaltige Lote	Pb88Sn12Sb Sn60Pb40Sb	Kühlerbau	2.1.1
			2.1.2
			2.1.3
Antimonarme Lote	Pb60Sn40 Sn60Pb40	Verzinnung, Klempnerarbeiten, verzinkte Feinbleche	2.2.2
			2.2.3
Antimonfreie Lote	Sn60Pb40E	Elektrotechnik Elektronik	1.1.1
			1.1.2
			1.1.3
Bleifreie Weichlote für die Elektronik	Sn99Cu1 Sn96Ag4 Sn96Ag3Cu1 Sn95Ag4Cu1	Elektrotechnik Elektronik	1.1.2
			1.1.3
			1.2.3
Hochbleihaltige, RoHS-konforme Weichlote	Pb93Sn5Ag2 Pb98Sn2 Pb98Ag2	Anwendung bei Einsatztemperaturen bis zu 200 °C	1.1.2
			1.1.3
			1.2.3
Bleifreie Weichlote für Trinkwasserleitungen	Sn97Ag3 Sn97Cu3	Trinkwasserleitungen Weitere wichtige Angaben im DVGW-Regelwerk	2.1.2
			3.1.1
			3.1.2
Bleifreie Weichlote für tiefe Temperaturen	Sn95Sb5 Sn97Ag3 Sn95Ag5	Kälteindustrie	3.1.1

Tabelle 7 – Lote für das Weichlöten von Kupfer

Hartlöten

Bei höheren mechanischen und thermischen Beanspruchungen wird hartgelötet. Für das Hartlöten von Kupfer wird vorzugsweise Messinglot, Kupfer-Phosphorlot und Silberlot eingesetzt. Silberlot besitzt eine niedrige Löttemperatur, welche die Gefahr der Grobkornbildung verringert und schnellere Lötgeschwindigkeiten ermöglicht.

Es ist wichtig bei der Wahl des Lötverfahrens auf den Sauerstoffgehalt des Kupfers zu achten. Beim Hartlöten von sauerstoffhaltigen Kupfersorten kann eine Wasserstoffversprödung auftreten, d. h. es entstehen Risse und Hohlräume beim Kontakt mit wasserstoffhaltigen Gasen. Davon betroffen sind z. B. Kupfersorten, die in der Elektrotechnik eingesetzt werden. Bei höheren Temperaturen (über 500 °C) reagiert der eindiffundierende

Wasserstoff mit dem Sauerstoff im Kupfer zu Wasser. Von der Wasserstoffkrankheit sind besonders das Flammhartlöten und das Löten unter reduzierendem Schutzgas betroffen, deshalb sollte z. B. auf die Verfahren Induktions- oder Vakuumlöten zurückgegriffen werden. Für das Flammlöten sollte die Verwendung von sauerstofffreien bzw. desoxidierten Kupfersorten geprüft werden, um eine Wasserstoffversprödung zu vermeiden.

Lotbezeichnung	Lotbeispiel nach DIN EN ISO 17672 (2010)	Bemerkung	Flussmittelbeispiel
Silberhartlot (Gruppe Ag)	Ag 244 Ag 134 Ag 145	· geeignet für Trinkwasserleitungen · besteht vorwiegend aus Ag, Cu, Zn · Löttemperatur ca. 650 – 830 °C	FH10
Kupfer-Phosphorhartlot (Gruppe CuP)	CuP 182 CuP 180 CuP 179 CuP 284 CuP 281 CuP 279	· wegen Phosphorgehalt ist kein Flussmittel notwendig · empfohlene Lötspaltbreite für P-Gehalt mit 5 % 0,125 mm · Löttemperatur ca. 650 – 730 °C	–
Messinglot (Gruppe Cu)	Cu 470a Cu 470 Cu 680 Cu 681	· geeignet für massive Bauteile · besteht vorwiegend aus Cu und Zn · Löttemperatur ca. 870 – 920 °C	FH10

Tabelle 8 – Lote für das Hartlöten von Kupfer

2.4. Löten von Kupferlegierungen

Eine Kupferlegierung besteht aus Kupfer und mindestens einem weiteren Metall. Es entsteht ein neuer Werkstoff mit neuen Eigenschaften. Zu den bekanntesten Kupferlegierungen gehören beispielsweise Messing, Neusilber, Bronze und Rotguss.

2.4.1. Niedriglegierte Kupferwerkstoffe

Niedriglegierte Kupferwerkstoffe enthalten bis etwa 5 % Legierungszusätze zum Kupfer. Bemerkenswert ist das Verhalten bei tiefen Temperaturen, da keine

Versprödung bis – 200 °C auftritt. Unberücksichtigt in dieser Werkstoffgruppe bleiben z. B. CuZn5, CuSn2, CuSn4, CuSn5, CuAl5As oder CuNi2, weil diese den Kupfer-Zink-, Kupfer-Zinn-, Kupfer-Nickel- und Kupfer-Aluminium-Legierungen zugeordnet werden. Die Zusammensetzungen der niedriglegierten Kupferwerkstoffe sind in DIN CEN/TS 13388 (2013) festgelegt. Es wird zwischen aushärtbaren und nicht aushärtbaren Knetlegierungen unterschieden. Bei den aushärtbaren Legierungen wie z. B. CuBe2, CuCr1Zr und

CuNi1Si kann eine Verbesserung der Festigkeit sowohl durch Kaltumformen als auch durch eine geeignete Wärmebehandlung erfolgen. Nicht aushärtbare Werkstoffe z. B. CuAg0,10, CuSi1 und CuSn0,15 können höhere Festigkeitswerte nur durch Kaltumformung erreichen [17]. Das Deutsche Kupferinstitut stellt weitere Informationen zu niedriglegierten Kupferwerkstoffen im Informationsdruck DK1-i8-2012 zur Verfügung.

Kaltverfestigte Legierungen

Kupfer-Silber

Kupfer-Silber-Legierungen wie CuAg0,10 (CW013A) oder CuAg0,10P (CW016A) zeichnen sich durch ihre hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit aus. Besonders eignen sich diese Legierungen für Dauerbelastungen bei hohen Temperaturen, wie z. B. in der Elektrotechnik. Das Silber erhöht die Entfestigungstemperatur (z. B. bei einer Legierung mit 0,1 % Ag auf etwa 350 °C), ohne dabei die elektrische Leitfähigkeit negativ zu beeinflussen. Die Kupfer-Silber-Legierungen sind in der DIN CEN/TS 13388 (2013) genormt und lassen sich sehr gut löten.

Für das Weichlöten werden bevorzugt bleifreie Zinnbasislote (z. B. Sn99Cu1) verwendet. Als Flussmittel werden unter anderem die Typen 3.1.1., 2.1.1. sowie 1.1.1. und 1.2.3. im Bereich der Elektrotechnik eingesetzt. Aufgrund der hohen Entfestigungstemperatur des Grundwerkstoffes bleiben bei fachgerechtem Weichlöten die durch Kaltumformung erzielten hohen Festigkeitswerte weitgehend erhalten.

Dagegen werden beim Hartlöten die durch Kaltumformung erreichten Festigkeitswerte der Kupfer-Silber-Legierung durch Erwärmung erheblich reduziert. Die sauerstofffreien, desoxidierten Legierungen wie z. B. CuAg0,10P (CW016A) mit 0,001 bis 0,007 % Phosphor oder einem anderen Desoxidationsmittel, wie Lithium, sind zum Hartlöten am besten geeignet. Im Allgemeinen wird mit den meisten Silberhartloten unter Verwendung von Flussmittel, wie beispielsweise Typ FH10, gearbeitet. Bei besonderen Anforderungen an die elektrische Leitfähigkeit der Lötverbindung wird auch mit Ag 272 (Ag72Cu28), ohne Flussmittel im Vakuum oder unter Schutzgasatmosphäre, hartgelötet. Grundsätzlich kann mit allen phosphorhaltigen Hartloten ohne Flussmittel gearbeitet werden. Beim

Lötvorgang ist der Bereich der Erwärmung möglichst klein zu halten, damit die Beeinträchtigung der Festigkeitswerte örtlich begrenzt bleibt, wobei jedoch unbedingt sicherzustellen ist, dass die Löttemperatur im gesamten Lötbereich eingehalten wird.

Kupfer-Eisen

Die Kupfer-Eisen-Legierung CuFe2P (CW107C) enthält 2,1 bis 2,6 % Eisen, sowie Zusätze aus Phosphor und Zink. Der Werkstoff zeichnet sich durch eine hohe thermische und elektrische Leitfähigkeit bei gleichzeitig hoher Zugfestigkeit und Entfestigungstemperatur aus. Daher liegt das Hauptanwendungsgebiet in der Elektrotechnik, wo diese Legierung in großem Umfang für Leadframes (Halbleiter-Bauteilträger) als Systemträgerwerkstoff eingesetzt wird. Diese typische Anwendung zeigt die Abbildung 8.

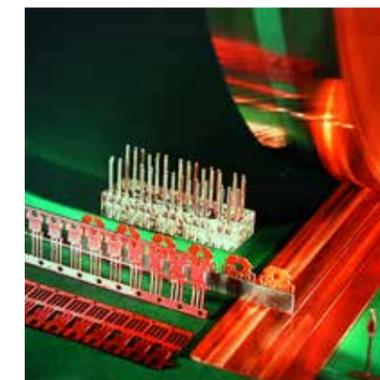


Abbildung 8 – Halbleiterträger [17]

Das Weichlöten kann mit Zinn-Kupfer-Weichloten erfolgen, wie z. B. Sn99,3Cu0,7 nach DIN EN ISO 9453:2014. Flussmittel vom Typ 3.1.1. können dazu verwendet werden.

Zum Hartlöten sind Silberhart-, Kupfer- und Phosphorlot sowie Flussmittel vom Typ FH10 geeignet.

Kupfer-Blei

Der Legierung CuPb1P (CW113C) sind 0,7 bis 1,5 % Blei zur Verbesserung der Zerspanbarkeit zugesetzt. Restphosphorgehalte von 0,003 bis 0,012 % sorgen für eine gute Desoxidation des Werkstoffs und schützen gegen Wasserstoffversprödung. Die Legierung besitzt eine sehr hohe elektrische Leitfähigkeit. Sie kommt oft anstelle von reinem Kupfer zum Einsatz, wenn gleichzeitig eine gute Zerspanbarkeit gefordert ist, wie bei der Fertigung von Automaten-Drehteilen aus einem hochleitfähigen Werkstoff. Es ist zu beachten, dass durch den Bleigehalt eine bedingte Schweißbeugung gegeben ist. Das Hartlöten ist ebenfalls nur bedingt möglich, das Weichlöten hingegen gut anwendbar.

Beim Weichlöten werden, wie bei reinem Kupfer, Zinn-Blei-Weichlote mit 40 bis 60 % Zinn eingesetzt. Als Flussmittel wird Typ 3.1.1. empfohlen. Für den Einsatz in der Elektronik werden bleifreie Zinnbasislote in Kombination mit nicht korrosiven Flussmitteln (z. B. 1.1.2, 1.1.3) verwendet.

Wenn Hartlöten nicht zu vermeiden ist, empfehlen sich Silberhartlote mit niedrigen Löttemperaturen, z. B. Ag 156 und Flussmittel vom Typ FH10.

Kupfer-Schwefel

Die Schwefelgehalte der Kupfer-Schwefel-Legierung CuSP (CW114C) von 0,2 bis 0,7 % verbessern die Zerspanbarkeit bei gleichzeitigem Erhalt der hohen elektrischen Leitfähigkeit. Der Phosphorgehalt von 0,003 bis 0,012 % gewährleistet die Wasserstoffbeständigkeit.

Weichlote siehe Kupfer-Silber

Zum Hartlöten werden bevorzugt Silberhartlote und Flussmittel vom Typ FH10 eingesetzt. Die Festigkeitskennwerte von kaltverfestigtem Material gehen dabei auf die des unverfestigten Grundzustands zurück.

Kupfer-Tellur

Die Kupfer-Tellur-Legierung CuTeP (CW118C) mit Zusätzen von 0,4 bis 0,7 % Tellur und 0,003 bis 0,012 % Phosphor besitzt die gleichen Eigenschaften wie die oben genannte Kupfer-Schwefel-Legierung.

Weichlote siehe Kupfer-Silber

Durch den Tellurzusatz wird die Anlassbeständigkeit auf Temperaturen um 300 °C erhöht. Bei fachgerechter Weichlötung kann eine wesentliche Verminderung der Festigkeit von kaltverformtem Material vermieden werden.

Zum *Hartlöten* werden meist Silberhartlote und Flussmittel des Typs FH10 verwendet. Die Festigkeitswerte von kaltverformtem Material gehen auf die des weichen Zustands zurück.

Kupfer-Zink

Die Legierung CuZn0,5 (CW119C) enthält etwa 0,1 bis 1,0 % Zink und bis zu 0,02 % Phosphor. Sie weist eine sehr hohe elektrische Leitfähigkeit auf, ist sehr gut kaltumformbar, wasserstoffbeständig und außerdem gut schweiß- bzw. hartlötbar. Daher ist das Hauptanwendungsgebiet die Halbleitertechnik, wo die Legierung als Systemträgerwerkstoff fungiert. Aufgrund der guten Tiefziehfähigkeit ist jedoch auch ein Einsatz zur Herstellung von Hohlwaren aller Art und von Wärmeübertragerelementen üblich.

Weichlote siehe Kupfer-Silber
Kurzzeitiges Weichlöten führt zu keiner Entfestigung des kaltverformten Grundwerkstoffes.

Das *Hartlöten* wird meist mit Silberhartloten unter Verwendung von Flussmittel des Typs FH10 durchgeführt.

Aushärtbare Legierungen

Im Gegensatz zu den kaltverfestigenden Knetlegierungen, die ihre durch Kaltumformung erzielte Festigkeit im Bereich der Erwärmung zumindest teilweise verlieren, lassen sich gewisse Lötungen an aushärtbaren Legierungen ohne Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften ausführen. Ebenso kann beim Ofenlöten das Löten und Aushärten in einem Arbeitsschritt kombiniert werden.

Kupfer-Beryllium

Kupfer-Beryllium-Legierungen CuBe1,7 (CW100C) und CuBe2 (CW101C) mit 1,6 bis 2,1 % Beryllium besitzen eine mittlere elektrische Leitfähigkeit, eine sehr hohe Zugfestigkeit im ausgehärteten Zustand und eine erhöhte Temperaturbeständigkeit. Die Legierung findet in verschiedensten Einsatzbereichen Anwendung, wie zum Beispiel bei Membranen, verschleißfesten Teilen und funkenarmen Werkzeugen. Die zu lötenden Bauteile sollten entfettet und gebeizt werden. Anschließend kann sofort der Lötprozess folgen, damit die Lötbarkeit nicht durch Anlaufschichten herabgesetzt wird. Ist eine sofortige Lötung nicht möglich, sollte auf die zu lötende Oberfläche eine dünne Verkupferung, Versilberung oder Verzinnung als Schutzschicht und Verbindungsschicht aufgebracht werden, so dass eine Verbesserung der Benetzung erfolgen kann.

Das *Weichlöten* wird grundsätzlich nach der Aushärtung mit geeigneten Weichloten durchgeführt, deren Fließtemperatur unter den üblichen Weichglüh-temperaturen liegt. Es wird mit bleifreiem Lot oder Sn60Pb39Cu1 weichgelötet. Auch kupferhaltiges Lot wie Sn97Cu3 kann genutzt werden. Abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit können Weichlötlösungsmittel der Typen 3.2.2. und 3.1.1. eingesetzt werden. Vorverzinnete Teile lassen sich mit kolophoniumhaltigen Flussmitteln der Typen 1.1.2. und 1.1.3. weichlöten.

Das *Hartlöten* wird nach Möglichkeit zwischen Lösungsglüh- und Aushärten durchgeführt. Dabei werden meist niedrigschmelzende Silberhartlote mit niedrigen Löttemperaturen zwischen 650 bis 670 °C, wie z. B. Ag 156 sowie Flussmittel, die niedrigschmelzende Fluoride hoher Aktivität enthalten, verwendet. Um die Aushärtbarkeit nicht zu gefährden, muss schnell und gegebenenfalls unter Kühlung der Lötstellenumgebung erwärmt und nach dem Erstarren des Lotes in Wasser abgeschreckt werden. Bereits eine Lötzeit über 30 Sekunden beeinträchtigt die Aushärtbarkeit, weshalb ein schnelles Löten erforderlich ist. Für Sonderfälle stehen hochschmelzende Hartlote, z. B. Ag 272 (Ag72Cu28) mit einer Löttemperatur von 780 °C, zur Verfügung. Dabei liegt die Löttemperatur stets im Lösungsbereich. Wegen der hohen Oxidationsneigung ist hierbei ein Arbeiten unter Schutzgas mit zusätzlichem Flussmittel zu empfehlen. Um die Aushärtungsfähigkeit zu sichern, werden die Teile nach dem Löten bis zum Erstarren der Lötverbindung auf etwa 760 °C gehalten und anschließend in Wasser abgeschreckt.

Kupfer-Beryllium-Blei

Die CuBe2Pb (CW102C) Legierung weist ähnliche Eigenschaften wie CuBe2 auf. Ein Unterschied ist die durch Blei verbesserte Zerspanbarkeit. Das Weichlöten und Hartlöten erfolgt analog.

Kupfer-Kobalt-Beryllium

Die Legierung CuCo2Be (CW104C) mit 2,0 bis 2,8 % Kobalt und 0,4 bis 0,7 % Beryllium ist eine hochleitfähige Variante der Kupfer-Beryllium-Legierungen. Sie weist bei geringfügig reduzierten Festigkeitswerten im Vergleich zu den hochfesten binären Kupfer-Beryllium-Legierungen eine mehr als doppelt so hohe elektrische Leitfähigkeit auf und ist wesentlich temperaturbeständiger. Hauptanwendungsgebiete sind stromführende und temperaturbelastete Federn, Teile für die Kunststoffverarbeitung und Elektroden von Widerstandsschweißmaschinen.

Die Erläuterung zum *Weich-* und *Hartlöten* von Kupfer-Beryllium gelten im Wesentlichen auch für Kupfer-Kobalt-Beryllium. Wenn der ausgehärtete Zustand erhalten bleiben soll, sind niedrig schmelzende Silberlote bei kurzen Lötzeiten zu verwenden.

Kupfer-Nickel-Beryllium

Durch Engpässe bei der Kobaltversorgung wurde die Legierung CuNi2Be (CW110C) entwickelt. Dabei wurde in der Kupfer-Kobalt-Beryllium-Legierung das Kobalt durch Nickel ersetzt. Diese Legierung ist in den mechanischen und physikalischen Eigenschaften äquivalent mit CuCo2Be. In der löstechnischen Verarbeitung beider Werkstoffe gibt es kaum Unterschiede. Der Vorteil einer CuNi2Be-Legierung gegenüber einer CuCo2Be-Legierung ist eine leicht höhere elektrische und thermische Leitfähigkeit.

Kupfer-Nickel-Silizium

Kupfer-Nickel-Silizium-Legierungen, wie CuNi1Si (CW109C), CuNi2Si (CW111C), CuNi3Si (CW112C) mit 1,0 bis 4,5 % Nickel und 0,4 bis 1,3 % Silizium, sind Werkstoffe mit mittlerer elektrischer Leitfähigkeit sowie hoher Zugfestigkeit. Sie werden vornehmlich zur Herstellung von Schrauben, Bolzen und Freileitungs-

armaturen eingesetzt. Zunehmend finden diese Legierungen auch bei Steckkontakten in der Automobilindustrie Verwendung.

Die Temperaturen für das *Weichlöten* liegen auch hier unter der Warmaushärtungstemperatur, so dass es dabei zu keiner nennenswerten Beeinflussung der mechanischen Kennwerte kommt. Als Weichlote können Zinn-Blei-Lote mit Flussmittel vom Typ 3.1.1. eingesetzt werden.

Zum Hartlöten sind Silberhartlote mit möglichst niedrigen Löttemperaturen unter Verwendung von Flussmittel vom Typ FH10 zu empfehlen. Die Festigkeitswerte der zu lötenden Bauteile werden durch Löttemperatur und Einwirkungszeit beeinträchtigt.

Kupfer-Chrom-Zirkon

Die Legierung CuCr1Zr (CW106C) beinhaltet 0,5 bis 1,2 % Chrom und 0,03 bis 0,3 % Zirkon. Im Gegensatz zu Kupfer-Chrom ist Kupfer-Chrom-Zirkon bei erhöhten Temperaturen nicht kerbempfindlich und hat deshalb den Werkstoff CuCr1 (CW105C) aus seinen Anwendungsgebieten weitgehend verdrängt. Die Legierung zeichnet sich durch eine hohe Festigkeit bei Raumtemperatur, eine hohe Entfestigungstemperatur sowie die verbesserte Zeitstandfestigkeit, auch bei erhöhten Temperaturen, aus.

Beim *Weichlöten* ist durch die hohe Anlassbeständigkeit warmausgehärteter Teile keine Minderung der Festigkeitswerte zu erwarten. Als Lote können nicht nur Zinn-Blei-Lote, sondern vor allem auch bleifreie Weichlote wie Sn95Ag5 bzw. Sn97Ag3 oder Sn95Sb5 mit Flussmittel vom Typ 3.1.1. verwendet werden.

Zum *Hartlöten* werden vorzugsweise niedrigschmelzende Silberhartlote unter Verwendung von Flussmittel des Typs

FH10 eingesetzt. Sowohl das Erwärmen als auch der eigentliche Lötvorgang sollen von kurzer Dauer sein, da sonst bei den höheren Löttemperaturen bereits mit einer zeitabhängigen Erweichung des Grundwerkstoffes gerechnet werden muss.

Kupfer-Zirkon

Die gegenüber Glühungen in wasserstoffhaltiger Atmosphäre unempfindliche Kupfer-Zirkon-Legierung CuZr (CW120C) enthält 0,1 bis 0,3 % Zirkon. Die Legierung besitzt eine sehr hohe Leitfähigkeit und Anlassbeständigkeit bei hoher Festigkeit und Zeitstandfestigkeit (Kriechfestigkeit). Bei höheren Temperaturen ist allerdings auf die hohe Affinität des Zirkons zum Sauerstoff und damit auf die Oxidation zu achten.

Beim *Weichlöten* müssen keine Besonderheiten beachtet werden. Auf Grund der hohen Entfestigungstemperatur können höher schmelzende Weichlote eingesetzt werden. Wenn aus Korrosionsgründen Flussmittel des Typs 3.2.2. nicht zulässig sind, sollten die Typen 2.1.2. bzw. 2.2.2. oder 1.1.2. gewählt werden.

Beim Fügen mit *Hartloten*, deren Löttemperatur über der Entfestigungstemperatur von Kupfer-Zirkon liegt, sind kurze Lötzeiten erforderlich, damit der ausgehärtete Zustand erhalten bleibt. Mit steigendem Massegehalt von Zirkon steigt auch die Entfestigungstemperatur, bei 0,2 % Zirkon liegt diese etwa bei 575 °C.

Kupfer-Chrom

Die Kupfer-Chrom-Legierung CuCr1 (CW105C) mit 0,5 bis 1,2 % Chrom ist als Knetwerkstoff wegen seiner Kerbempfindlichkeit bei höheren Temperaturen weitgehend durch die zuvor beschriebene Kupfer-Chrom-Zirkon-Legierung substituiert worden. Beide unterscheiden sich kaum in ihrem Lötverhalten. Dagegen wurde der Gusswerkstoff CuCr1-C (CC140C) in seinen Anwendungsbereichen beibehalten, da die Herstellung von Kupfer-Chrom-Zirkon-Gusslegierungen nur sehr schwierig oder gar nicht möglich ist. Diese Gusslegierung wird selten gelötet. Sie unterscheidet sich in der Löttauglichkeit jedoch nicht von der Kupfer-Chrom-Legierung.

Ohne dass die Festigkeitskennwerte beeinflusst werden, lässt sich diese Legierung mit Blei-Zinn-Loten oder mit höher schmelzenden bleifreien Weichloten unter Verwendung von Flussmitteln *weichlöten*.

Beim *Hartlöten* werden bevorzugt niedrigschmelzende Silberlote eingesetzt. Das Lot Ag 156 führt bei einer kurzen Lötzeit zu relativ geringem Festigkeitsverlust.

2.4.2. Hochlegierte Kupferwerkstoffe

Kupferlegierungen mit mehr als 5 % Legierungselementen gehören zu der Gruppe der hochlegierten Kupferwerkstoffe. Sie sind in der DIN CEN/TS 13388 (2013) genormt. Zu ihnen zählen beispielsweise Kupfer-Zink- (Messing), Kupfer-Zinn- (Bronzen) und Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen (Neusilber).

Kupfer-Zink-Legierungen

Von allen Kupferlegierungen kommen die Kupfer-Zink-Legierungen am meisten und in fast allen Bereichen zur Anwendung. Gründe hierfür sind z. B. die ansprechende Farbe, die leichte Bearbeitbarkeit, sowie die guten physikalischen und Festigkeitseigenschaften. Es wird unterschieden zwischen Kupfer-Zink-Legierungen (Messing):

- ohne weitere Legierungselemente (binäre Kupfer-Zink-Legierungen bzw. Zweistofflegierungen),
- mit Blei (Kupfer-Zink-Blei-Legierungen bzw. bleihaltig) und
- mit weiteren Legierungselementen (komplexe Kupfer-Zink-Legierungen bzw. Mehrstofflegierungen).

Es existieren Kupfer-Zink-Knet- und Gusslegierungen.

Weichlöten

Obwohl die Elemente Zink und Zinn in Weichloten keine gegenseitige Verträglichkeit aufweisen, sind die binären und bleihaltigen Kupfer-Zink-Legierungen (Messing und bleihaltiges Messing) grundsätzlich gut weichlötlbar. Zum Weichlöten der Kupfer-Zink-Legierungen sollten möglichst sogenannte antimonarme Lote (mit max. 0,5 % Antimon) verwendet werden. Sind Zugspannungen vorhanden, können höhere Antimongehalte durch die Entstehung von spröden Antimon-Zink-Kristallen zur Lötbrüchigkeit in der Lötstelle und im Grundwerkstoff führen. Je nach Anwendung können Zinn-Blei- bzw. Blei-Zinn-, Zinn-Kupfer- und Zinn-Silber-Legierungen zum Löten verwendet werden. Bei Weichlötungen im Lebensmittelbereich, z. B. an Fittings und Armaturteilen aus Kupfer-Zink-Legierungen in kupfernen Trinkwasserleitungen, können die Weichlote Sn97Ag3 bzw. Sn95Ag5 und Sn97Cu3 eingesetzt werden. Im Gegensatz zu reinem Kupfer neigen kaltumgeformte Kupfer-Zink-Legierungen bei langen Lötzeiten und hoher Lotzufuhr sowohl beim

Weich- als auch beim Hartlöten zur Lötbrüchigkeit. Wenn an der Lötstelle ein inhomogener Spannungszustand vorliegt, treten beim Benetzen der Teile mit flüssigem Lot Brüche im Grundwerkstoff auf. Die Gefahr der Lötbrüchigkeit ist besonders groß, wenn die zu lötenden Teile in der Phase der Lotbenetzung umgeformt werden. Unter den binären Kupfer-Zink-Legierungen sind diejenigen mit α -Gefüge, z. B. CuZn30 (CW505L), für die Lötbrüchigkeit anfälliger als solche mit $\alpha+\beta$ -Gefüge z. B. CuZn37 (CW508L). Im Zweifelsfall ist der Spannungszustand zu minimieren, indem die kaltverfestigten Teile vor dem Löten spannungsarm- bzw. weichgeglüht werden. Die Erfahrungen zeigen, dass anschließend keine Lötbrüchigkeit auftritt.

Zum Weichlöten werden Flussmittel der Typen 3.1.1., 3.1.2. und 2.1.2. bzw. 2.2.2. eingesetzt.

Kupfer-Zink-Knetlegierungen mit weiteren Legierungszusätzen (Sondermessing) sind problemlos weichlötlbar. Eine Ausnahme stellen die aluminiumhaltigen Kupfer-Zink-Legierungen dar, denn durch diese können aufgrund der hohen Sauerstoffaffinität des Aluminiums (Oxidfilme) einige Probleme auftreten. Durch Verwendung von Flussmitteln kann aber eine Auflösung der Oxidfilme erreicht werden. Die Kupfer-Zink-Gusslegierungen werden selten weichgelötet. Sie unterscheiden sich jedoch löttechnisch nicht wesentlich von den Knetlegierungen vergleichbarer Zusammensetzung.

Hartlöten

Mechanisch und thermisch höher beanspruchte Werkstücke aus Kupfer-Zink-Legierungen werden hartgelötet. Grundsätzlich besteht hierbei die Gefahr einer Löttrissigkeit, die jedoch durch Spannungsarmglühen und den Einsatz von niedrigschmelzenden Hartloten sowie durch die Minimierung von äußeren Spannungen vermeidbar ist. Zum Hartlöten von binären Kupfer-Zink-Legierungen mit niedrigem Zinkgehalt eignen sich z. B. die Messinglote Cu 470a und Cu 680. Deren Löttemperaturen liegen unter den Solidustemperaturen dieser Grundwerkstoffe. Darüber hinaus werden je nach Löttemperatur und geforderter Dehnbarkeit der Lötstelle silberhaltige Hartlote mit niedrigen Löttemperaturen verwendet. Aufgrund der Erwärmung ist die Festigkeit der Lötstelle meist niedriger als die des Grundwerkstoffs. Bei ausreichender Überlappung treten mögliche Brüche nicht mehr an der Lötstelle, sondern in der weichgeglühten Randzone (Wärmeübergangszone) auf. In der Kupferrohrinstallation werden Fittings und Armaturen aus Kupfer-Zink-Legierungen mit Kupfer auch durch Hartlöten mit CuP 279, CuP 179 oder Ag 145, Ag 134 sowie Ag 244 und Flussmittel vom Typ FH10 gefügt.



Abbildung 9 – Metallographischer Längsschliff einer Rohr-Fitting-Verbindung (Ag-CuP-Legierung) [18]

Phosphorhaltige Lote sind auf Messing nicht wie auf Reinkupfer selbstfließend und benötigen daher Flussmittel. Bleihaltige Kupfer-Zink-Legierungen, insbesondere mit Bleigehalten von über 3 %, sind schlechter hartlötlbar als die binären Legierungen und können spröde Lötstellen aufweisen. Sie sind unter Einschränkungen mit niedrigschmelzenden Silberhartloten und Flussmittel des Typs FH10 hartlötlbar. Aluminiumhaltige Kupfer-Zink-Legierungen sind gut hartlötlbar. Bei Aluminiumgehalten von mehr als 1 % sind nur Flussmittel des Typs FH11 zu verwenden. Als Hartlote können niedrigschmelzende Hartlote benutzt werden. Für korrosionsbeanspruchte Bauteile sollten Silberhartlote mit höheren Silbergehalten eingesetzt werden. Bei Meerwasserbeanspruchung werden Hartlote mit Silbergehalten von etwa 40 – 56 % empfohlen, dazu gehören z. B. Ag 140, Ag 155 und Ag 244. Die Norm VG 81245-3 (1991) enthält alle Nichtisen-Schwermetall-Schweißzusätze und Hartlote, welche beim Bau von Schiffen und schwimmenden Geräten anzuwenden sind [19]. Die US-AWS 5.8. empfiehlt für maritime Anwendungen das nickelhaltige Silberhartlot BAg-3 mit 50 %igen Silbergehalt. Es handelt sich dabei um cadmiumhaltige Hartlote. Diese sind lt. EU Verordnung 494/2011 in der EU verboten. Eine cadmiumfreie Hartlotalternative ist z. B. Ag 450. Die Kupfer-Zink-Gusslegierungen werden in gleicher Weise wie die Knetlegierungen hartgelötet.

Anwendungsbeispiele

Gelötete Komponenten aus Kupfer-Zink-Legierungen werden z. B. für die Elektro- und Automobilindustrie, Kommunikations- und Haushaltsgerätekunde, elektrische und mechanische Systeme in größeren Stückzahlen gefertigt und in dieser Vielfalt eingesetzt.

Kupfer-Zinn-Legierungen

Die Kupfer-Zinn-Legierungen (Bronzen) sind wichtige Werkstoffe für die Elektrotechnik (z. B. stromführende Federn) und den Maschinenbau (Gleitelemente, Lagerbuchsen, Membranen). Diese werden in Knetlegierungen und Gusslegierungen unterteilt.

Weichlöten

Kupfer-Zinn-Knetlegierungen lassen sich, ähnlich wie reines Kupfer gut weichlöten, obwohl die Benetzung etwas langsamer stattfindet. Es ist gegebenenfalls ratsam (z. B. beim Schwalllöten), mit bleifreiem Lot Sn99Cu1 vorzuverzinne. Üblicherweise werden zum Weichlöten bleifreie Lote (Sn96Ag3Cu1, Sn99Cu1) eingesetzt.

Für Feinlötungen sind als Flussmittel z. B. die Typen 1.1.2., 1.1.1. oder 1.1.3. möglich. Bei allgemeinen Lötungen sind die Flussmitteltypen 3.1.1. und 3.1.2. einzusetzen. Kupfer-Zinn-Gusslegierungen werden kaum weichgelötet, verhalten sich jedoch löttechnisch wie die Knetlegierungen mit vergleichbarer Zusammensetzung.

Hartlöten

Auch bei den Kupfer-Zinn-Knetlegierungen bewirkt Hartlöten einen Weichglüheffekt an der Lötstelle. Vorzugsweise kommen hierbei niedrigschmelzende Silberhartlote, wie z. B. Ag 156 und für Kapillarlötungen auch Kupfer-Phosphor-Lote, wie CuP 179 oder CuP 182, zum Einsatz. Anderenfalls besteht die Gefahr einer Anschmelzung und der damit verbundenen Versprödung durch Grobkornbildung. Bei Löttemperaturen unter 800 °C werden Flussmittel vom Typ FH10, über 800 °C, solche vom Typ FH20 verwendet. Gussteile aus Kupfer-Zinn-Legierungen, die weniger als 1,5 % Blei enthalten, lassen sich mit Silberloten gut hartlöten. Bei Meerwasserbeanspruchung gelten gleiche Empfehlungen wie bei Kupfer-Zink-Legierungen (siehe Absatz Kupfer-Zink-Legierungen, Hartlöten).

Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen

Kupfer-Nickel-Zink-Knetlegierungen (Neusilber) werden in der Elektrotechnik (als Federwerkstoffe), im Bauwesen, in der Feinmechanik z. B. als Bügel und Scharniere in Brillengestellen, im Kunstgewerbe sowie als Modeschmuck eingesetzt. Die Gusslegierungen werden z. B. für Schiffsbeschläge, Armaturen und Kunstguss verwendet. Kupfer-Nickel-Zink-Gusslegierungen verhalten sich löttechnisch ähnlich wie die Kupfer-Zink-Knetlegierungen.

Weichlöten

Zum Weichlöten werden neben den Blei-Zinn-Loten bevorzugt die bleifreien Weichlote Sn97Ag3 bzw. Sn95Ag5 verwendet, da sie eine bessere Bindungs- und Benetzungsfähigkeit aufweisen. Die beim Weichlöten auftretenden Temperaturen führen zu keiner Entfestigung des kaltverfestigten Grundwerkstoffs. Voraussetzung für eine gute Benetzung der Lötstellen sind fett- und oxidfreie Oberflächen. Zur Sicherstellung einer optimalen Benetzung sollten die zu lötenden Oberflächen vorher besonders sorgfältig gebeizt (z. B. mit 10 %iger Schwefelsäure) und entfettet werden. Als Flussmittel sind die stark aktivierenden Typen 3.2.2. oder 3.1.1. zu verwenden.

Hartlöten

Hartlöten von Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen kann mit silberhaltigen Hartloten erfolgen. Das am häufigsten eingesetzte Messinglot Cu 681 hat die gleiche silbergraue Farbe wie die Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen. Als Flussmittel ist z. B. der Typ FH10 geeignet. Beim Hartlöten im Ofen ist die Beeinträchtigung der durch Kaltumformung erreichten Festigkeitseigenschaften zu beachten. Bleihaltige Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen neigen beim Glühen zur Rissbildung, insbesondere nach starker Kaltumformung. Daher sollten beim Hartlöten dieser Legierungen niedrigschmelzende Silberhartlote eingesetzt und dabei nicht zu schnell erwärmt werden.

Kupfer-Nickel-Legierungen

Kupfer-Nickel-Legierungen gehören zu den korrosionsbeständigsten Kupferwerkstoffen. Die Knetlegierungen sind wichtige Werkstoffe für den Schiffbau (insbesondere für Kondensatoren und Seewasserleitungen), den Apparatebau und die Elektrotechnik (z. B. als Widerstands-Werkstoffe). Die Gusslegierungen finden neben der Nautik auch im Maschinenbau und in der chemischen Industrie Anwendung.

Weichlöten

Diese Legierungen verhalten sich löttechnisch ähnlich wie reines Kupfer. Die etwas träge Benetzung beim Weichlöten ist durch den Einsatz von Flussmitteln ausgleichbar. In Ausnahmefällen sollte vorverzinnt werden. Hierzu eignen sich bleifreie Zinn-Silber- und Zinn-Kupfer-Weichlote, wie z. B. Sn95Ag5 bzw. Sn97Ag3 oder Sn97Cu3, die im Vergleich zu den früher verwendeten bleihaltigen Zinnloten bessere Festigkeitseigenschaften sowie höhere Korrosions- und Temperaturbeständigkeit besitzen. Als Flussmittel werden die Typen 3.2.2. oder 3.1.1. eingesetzt. Kupfer-Nickel-Legierungen werden in der Elektrotechnik sehr oft vorverzinnt oder vorversilbert und anschließend mit kolophoniumhaltigen Flussmitteln vom Typ 1.1.2. oder 1.1.3. weichgelötet. Dagegen hat die speziell für federnde Bauelemente verwendete Legierung CuNi9Sn2 (CW351H) eine sehr gute Anlaufbeständigkeit und ist deshalb auch nach langer Lagerungszeit sehr gut lötlbar. Für Lötungen an elektrischen Widerständen, die höheren Temperaturen ausgesetzt sind, werden höher schmelzende Weichlote angewendet. Die Kupfer-Nickel-Gusslegierungen werden kaum weichgelötet.

Hartlöten

Kupfer-Nickel-Legierungen haben eine höhere Solidustemperatur als Kupfer. Daher ist das Hartlöten vor allem bei Legierungen mit höheren Nickelgehalten auch mit reinem Kupfer möglich. Allgemein werden jedoch Kupferhartlote, wie z. B. Cu

470a bis Cu 680 oder Cu 681 mit Flussmitteln des Typs FH21, sowie Silberhartlote in Verbindung mit vor Oxidation schützenden Flussmitteln des Typs FH10 eingesetzt. Um eine Lötbrüchigkeit zu vermeiden, sollten die verwendeten Lote phosphorfrei sein. Für die eisenhaltigen Kupfer-Nickel-Legierungen werden meist Cu 773 und Ag 244 gewählt. Der Legierungstyp CuNiSn wird mit höheren Ni- und Sn-Anteilen (CuNi13Sn8) für hochwertige, filigrane Brillengestelle mit exzellenten Federbiegeeigenschaften genutzt und mit Silberhartloten gefügt. Bei Meerwasserbeanspruchung sollte das Hartlot einen Silbergehalt von etwa 40 bis 56 % besitzen. In der Norm, VG 81245 Teil 3 (1991) „Schweißzusätze und Hartlote für den Bau von Schiffen und schwimmenden Gerät“ [19], werden die Silberlote Ag 140, Ag 155 und Ag 244 nach ISO 17672 (2010) angegeben. Die US-AWS 5.8 empfiehlt das nickelhaltige Silberhartlot BAg-3, mit einem Silbergehalt von 50 %, für maritime Anwendungen. Hierbei handelt es sich um ein cadmiumhaltiges Hartlot; die cadmiumfreie Alternative ist das Lot Ag 450 nach DIN ISO 17672 (2011). Zum Hartlöten wird das Flussmittel vom Typ FH11 empfohlen. Die Hartlöteignung der Kupfer-Nickel-Gusslegierungen entspricht dem der Knetlegierungen mit ähnlicher Legierungszusammensetzung.

Kupfer-Aluminium-Legierungen

Kupfer-Aluminium-Legierungen (Aluminiumbronzen) zeichnen sich durch eine außerordentlich hohe Kavitationsfestigkeit aus und gehören darüber hinaus zu den korrosionsbeständigsten Kupferwerkstoffen. Deshalb sind sie als Knet- und Gusslegierungen unentbehrliche Werkstoffe für die chemische Industrie und den Maschinenbau. Sowohl beim Weich- als auch Hartlöten von Kupfer-Aluminium-Legierungen sind zur Auflösung der chemisch sehr widerstandsfähigen Aluminiumoxide immer Flussmittel erforderlich. Die Kupfer-Aluminium-Gusslegierungen werden kaum gelötet, verhalten sich jedoch löttechnisch wie die Knetlegierungen mit vergleichbarer Zusammensetzung.

Weichlöten

Kupfer-Aluminium-Legierungen werden selten weichgelötet, da sich die Benetzbarkeit der Grundwerkstoffe mit steigendem Aluminiumgehalt verschlechtert, so dass eine Bindung nur bedingt und nur mit Hilfe spezieller Flussmittel erfolgen kann. Als Weichlote kommen für Einzellötungen Sn97Cu3 bzw. Sn97Ag3 und für höhere Temperaturbeanspruchungen CdAg5 infrage. Die cadmiumhaltigen Weichlote werden jedoch nur noch vereinzelt angeboten, weil sie gesundheitsgefährdend sind. Es können Spezialflussmittel für Aluminiumlegierungen vom Typ 2.1.2. bzw. 2.1.3 eingesetzt werden.

Hartlöten

Das Hartlöten ist problemlos durchführbar, sofern auch hier geeignete Flussmittel verwendet werden. Als Hartlote kommen Silberhartlote mit niedrigen bis mittleren Löttemperaturen, z. B. Ag 156 zum Einsatz. Bei Meerwasserbeanspruchung sind gleiche Empfehlungen vorgesehen wie bei Kupfer-Zink-Legierungen (siehe Absatz Kupfer-Zink-Legierungen, Hartlöten).

Kupfer-Zinn-Zink-Gusslegierungen

Die Kupfer-Zinn-Zink-Gusslegierungen (Rotguss) verfügen über gute Gleit- und Notlaufeigenschaften, hohe Kavitations- und Verschleißfestigkeiten sowie Beständigkeit im Meerwasser. So werden sie vor allem für Armaturen, Ventil- und Pumpengehäuse, Fittings und Gleitlager eingesetzt. Zum Weichlöten sind je nach Verwendungszweck ausgewählte Zinn-Bleilote mit mindestens 60 % Zinn geeignet. Als Flussmittel werden die Typen 3.1.1. und 3.1.2. verwendet. Fittings bzw. Armaturenteile aus Rotguss für Trinkwasserleitungen werden in der Kupferrohrinstallation mit den blei- und antimonfreien Weichloten gelötet. Gussteile, die weniger als 1,5 % Blei enthalten, lassen sich unter Einsatz von Silberhartloten mit mindestens 30 % Silber und Flussmitteln des Typs FH10 gut hartlöten. Praktische Bedeutung hat das Hartlöten von Kupferrohren mit Rotgussflanschen im Apparatebau. Für Meerwasserleitungen sind die Vorschriften der Klassifikationsgesellschaften zu beachten, wobei der Silbergehalt der einzusetzenden Hartlote etwa 50 % beträgt. Bei der Kupferrohrinstallation für Trinkwasserleitungen kommen bei Verwendung von Rotgussfittings die Hartlote CuP 279 oder CuP 179 unter Verwendung von Flussmittel des Typs FH10 zum Einsatz.

Kupfer-Blei-Zinn-Gusslegierungen

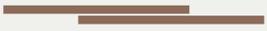
Die Guss-Zinn-Blei-Bronzen sind wichtige Konstruktions- und Lagerwerkstoffe, die kaum gelötet werden. Zum Weichlöten kommen Zinn-Bleilote mit 50 bis 60 % Zinn und Flussmittel des Typs 3.1.1. und 3.1.2. zum Einsatz. Für das Hartlöten werden niedrigschmelzende Silberhartlote wie z. B. Ag 156 und Flussmittel des Typs FH10 verwendet, wobei die Hartlöteignung deutlich eingeschränkt ist. Bei höheren Bleigehalten muss sogar mit massiven Diffusionserscheinungen gerechnet werden.

Löten von Kupferwerkstoffen untereinander und mit anderen Werkstoffen

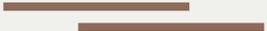
In der Praxis werden oft Kupferwerkstoffe verschiedenster Art untereinander oder auch mit anderen Metallen gefügt. Für eine Vielzahl von Anwendungen kommen beispielsweise durch Hartlöten hergestellte Verbindungen von Kupferwerkstoffen mit Stahl zum Einsatz. Dabei ist zu beachten, dass Stähle und Nickellegierungen wegen ihrer Sprödphasenbildung nicht mit CuP-Loten gelötet werden können. Die Auswahl der Lote wird vom Werkstoff bestimmt, der die schlechtere Löteneignung besitzt. Für Gestaltung und Lötverfahren sind die unterschiedlichen Eigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit, Wärmeausdehnung und spezifische Wärme der zuzufügenden Werkstoffe zu beachten. Außerdem wurden aufgrund zunehmender Bedeutung von Metall/Keramik-Verbunden für industrielle Anwendungen entsprechende Lösungen entwickelt und die Eigenschaften solcher Kombinationen untersucht. So können z. B. Kupfer und Keramik (Al₂O₃) mit Aktivloten hartgelötet oder mit Zinn-Blei-Loten weichgelötet werden. Aktivlote enthalten in der Regel Titan, welches durch eine Reaktion an der Grenzfläche Lot-Keramik die Benetzung ermöglicht [9].

3. Löt-sicherheit

Die Löt-sicherheit befasst sich mit Konstruktionseigenschaften, wie z. B. der Gestaltung der Lötstelle und deren Beanspruchung. Vorüberlegungen bezüglich der Betriebsbeanspruchung, dem Einsatz des Grundwerkstoffes und die Auswahl des Lötverfahrens sind erforderlich. Es wird unterschieden zwischen Verbindungs-löten (Fügen durch Löten) und Auftrags-löten (Beschichten durch Löten). Beim Verbindungs-löten wird eine weitere Unterteilung in Spalt- und Fugenlöten vorgenommen (siehe Tabelle 9).



Spaltlöten
Ein enger Spalt, der Lötspalt, wird zwischen den zu fügenden Teilen durch kapillaren Fülldruck mit Lot gefüllt. Um ein gleichmäßiges Spaltfüllen zu gewährleisten, kann die Liquidustemperatur des Lotes 20 – 50 °C überschritten werden [9].



Fugenlöten
Ein breiter Spalt, die Löt-fuge, wird vorwiegend mit Hilfe von Schwerkraft gefüllt [9]. Das flüssige Löt-gut wird durch Oberflächenspannungen in der Fuge gehalten.

Tabelle 9 - Unterschied Spaltlöten und Fugenlöten

Beim Spaltlöten darf die Löt-fuge nicht größer als maximal 0,5 mm sein, denn sonst handelt es sich um das Fugenlöten. Das Fugenlöten verbraucht eine größere Lotmenge als das Spaltlöten. V-, I- und X-Naht kommen dabei häufig zur Anwendung. Die folgende Übersicht zeigt Spaltweiten für verschiedene Verfahren an:

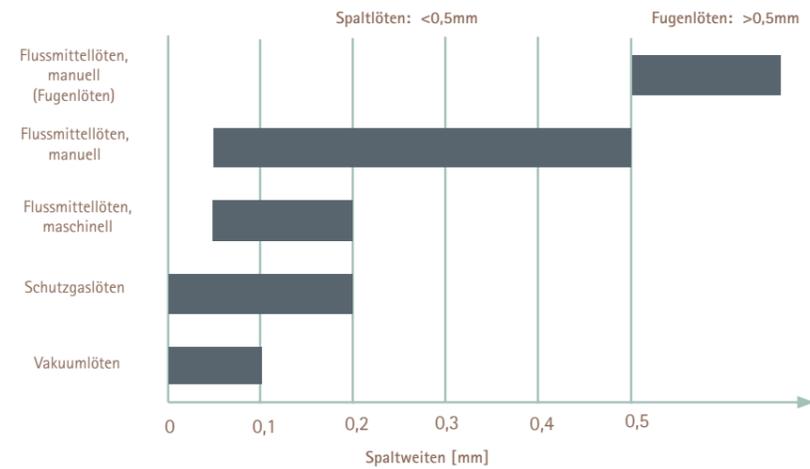
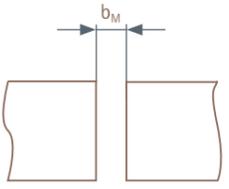
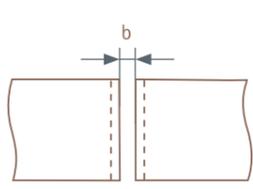


Abbildung 10 - Unterschied Spalt- und Fugenlöten

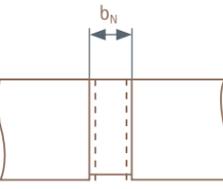
Bei Raumtemperatur wird der Spalt zwischen den zu fügenden Teilen als Montagespalt bezeichnet. Die bei Erwärmung bzw. Löttemperatur auftretende thermische Ausdehnung der Fügepartner, die bei verschiedenen Werkstoffen auch unterschiedlich sein kann, wird mit dem Ausdruck Lötspalt berücksichtigt.



Montagespalt
Schmaler, hauptsächlich paralleler Spalt zwischen den zu löten den Bauteilen, gemessen bei Raumtemperatur [10].



Lötspalt
Schmaler, hauptsächlich paralleler Spalt, der bei Löttemperatur zwischen den zu löten den Bauteilen besteht [10].



Löt-nahtbreite
Kann durch Anschmelz-vorgänge größer als der Montagespalt sein.

Tabelle 10 - Übersicht Montagespalt, Lötspalt und Löt-nahtbreite

Die Spaltweiten sollten immer eng gestaltet werden, um den Kapillareffekt beim Spaltlöten gut ausnutzen zu können (siehe Abbildung 11). Der Kapillareffekt tritt aufgrund der Oberflächenspannung auf. Dabei ist eine Kraft vorhanden, welche Flussmittel und das geschmolzene Lot in den Spalt zwischen die zufügenden Bauteile hineinzieht.

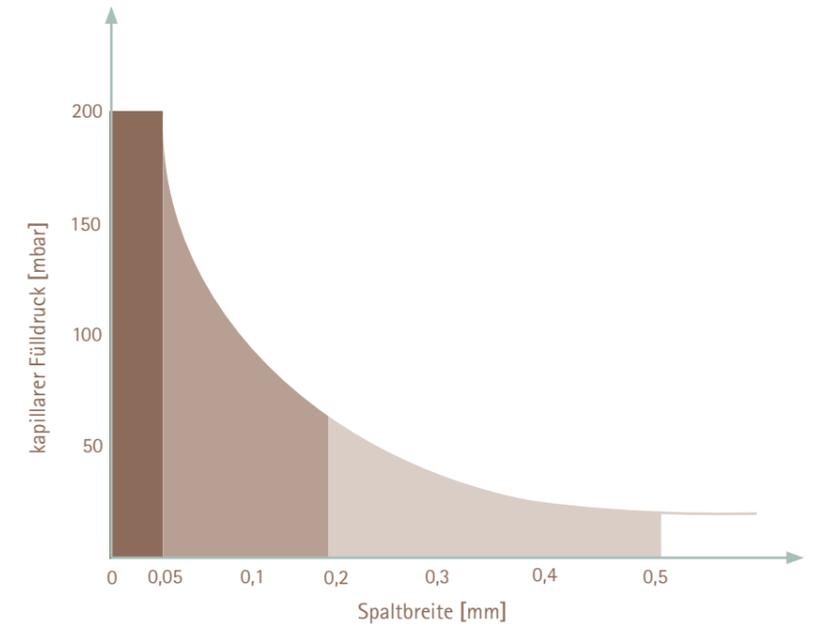


Abbildung 11 - Kapillarer Fülldruck in Abhängigkeit von der Spaltbreite [12]

Für das Spaltlöten sollte ein Lötspalt von 0,05 bis 0,5 mm vorgesehen werden. Neben der Breite des Lötspalts haben auch die Spaltquerschnitte (siehe Abbildung 12) einen Einfluss auf den Fülldruck und damit auf das Löt-ergebnis. Eine offene Hohlkehle hat einen 4,5-fach höheren kapillaren Fülldruck als ein paralleler Flächenspalt [9].

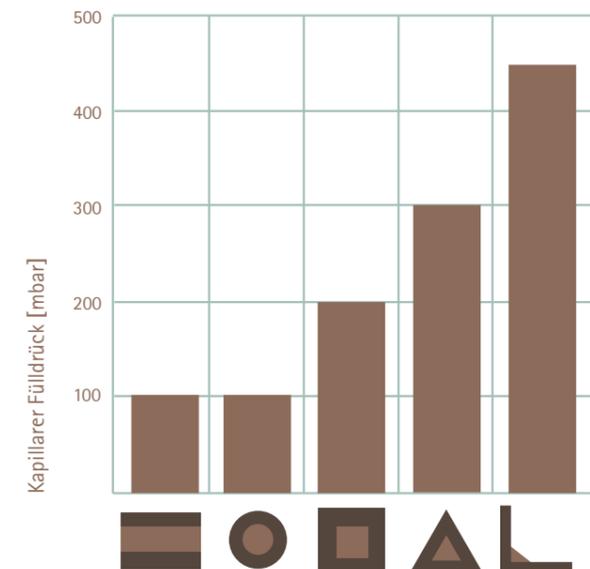


Abbildung 12 - Kapillarer Fülldruck in Abhängigkeit von der Spaltgeometrie [12]

4. Lötverfahren

Die Fließrichtung des Lotes sollte in die Konstruktion mit einbezogen werden. Das Unterbrechen des Lötspaltes ist nicht geeignet, da das Lot die Spaltbreiten nicht überbrücken kann. Im Lötstoßbereich sind Spannungskonzentrationen, Biegebeanspruchungen und geometrische Kerbwirkungseffekte möglichst zu vermeiden. Eine Schubbeanspruchung von Löt Nähten ist von Vorteil. Für das Löten mit Flussmittel muss durch den Spalt ein

Abfluss des Flussmittels und das Entweichen von Luft ermöglicht werden. Meist haben Lote und Lötgut geringere Festigkeiten als der Grundwerkstoff, deshalb sollte die Fügefläche groß genug sein, um eine sichere feste Verbindung zu erreichen. Häufig werden Überlapp- oder Einsteckverbindungen realisiert. Die Tabelle 11 führt weitere geometrische Varianten von Lötverbindungen auf.

Des Weiteren ist bei der Gestaltung der Lötverbindung die Stoßform sowie die Oberflächenbeschaffenheit der Fügeteile zu beachten. Rillen und Riefen sind auf der Oberfläche prinzipiell nicht sinnvoll. Wenn ein Rillenverlauf besteht, ist es wichtig, dass dieser mit der Fließrichtung des Lotes übereinstimmt. Auch die Nachbehandlung der Bauteile ist bei der Konstruktion zu beachten. Rückstände von Fluss-, Binde- und Lötstopfmitteln sollten sich leicht entfernen lassen. Ähnlich wie bei Schweißverbindungen sind sprunghafte Querschnitte zu vermeiden und auf allmähliche Übergänge (z. B. durch Lothohlkehle) bezüglich der Dauerfestigkeit Wert zu legen. Regeln zur symbolischen Darstellung von Löt Nähten können der Norm DIN EN 22553 (1997) entnommen werden [6].

	$\alpha = 0^\circ / 180^\circ$	$0^\circ < \alpha < 90^\circ$	$\alpha = 90^\circ$	$90^\circ < \alpha < 180^\circ$
	Stumpf-Stoß	Schräg-Stoß	T-Stoß	Schräg-Stoß
				
Mögliche Lötverbindungen	<ul style="list-style-type: none"> für Fugenlöten und Spaltlöten möglich relativ kleine Lötflächen realisierbar 	<ul style="list-style-type: none"> Eck-Stoß für Fugenlöten und Spaltlöten möglich relativ kleine Lötflächen realisierbar 	<ul style="list-style-type: none"> Eck-Stoß für Fugenlöten und Spaltlöten möglich relativ kleine Lötflächen realisierbar 	<ul style="list-style-type: none"> Eck-Stoß für Fugenlöten und Spaltlöten möglich relativ kleine Lötflächen realisierbar
Bevorzugte Lötverbindungen	<ul style="list-style-type: none"> Überlapp-Stoß Parallel-Stoß für Fugenlöten und Spaltlöten möglich große Lötflächen realisierbar bevorzugt an Blechen und Rohren 	<ul style="list-style-type: none"> Einsteckverbindung Gewährleistung der Lötverbindung durch große Lötflächen 		

Tabelle 11 - Geometrische Varianten von Lötverbindungen nach [6]

4.1. Lötprinzip

Für das Aufschmelzen des Lotes muss thermische Wirkenergie in die gesamte Fügezone gleichmäßig eingebracht werden. Dies erfolgt nach einem bestimmten Temperatur-Zeit-Verlauf, um die Prozessschritte

1. Schmelzen des Flussmittels,
2. Aktivierung der Oberfläche,
3. Schmelzen des Lotes,
4. Benetzen der zu lötenden Werkstücke durch das Lot,
5. Fließen des Lotes in den Lötspalt sowie das
6. Ausfüllen des Lötspaltes durch das Lot

zu ermöglichen [6]. In Abbildung 13 sind die charakteristischen Temperaturen und Zeiten beim Löten dargestellt und im Kapitel 6 Begriffe nach DIN ISO 857-2 erläutert. Der abgebildete thermische Verlauf ist besonders typisch für das Ofenlöten.

Die Haltedauer bei Löttemperatur erfolgt aus wirtschaftlichen Gründen meist nur bis zum Temperatenausgleich in der Baugruppe. Nach einer relativ kurzen Haltedauer erfolgt die Abkühlung an ruhender Luft bei Raumtemperatur oder mit definierten Abkühlbedingungen. Das Lötgut erstarrt. Die Wiederaufschmelztemperatur des Lötgutes entspricht etwa der

Schmelztemperatur des angewendeten Lotes. Für hohe Betriebsbeanspruchungen wird eine erhöhte Wiederaufschmelztemperatur des Lötgutes angestrebt, damit eine optimale Qualität der Lötverbindung hergestellt werden kann. Dies wird erreicht, indem die Haltedauer bei Löttemperatur im Vergleich zu anderen Verfahren deutlich länger ist. Das wiederum führt zu einer diffusionsbedingten Änderung der chemischen Zusammensetzung des Lötgutes, wodurch sich ebenfalls Solidus- und Liquidustemperatur des Lötgutes ändern. Im Anschluss kann ein Diffusionsglühen der Fügeverbindung bei Löttemperatur erfolgen [1].

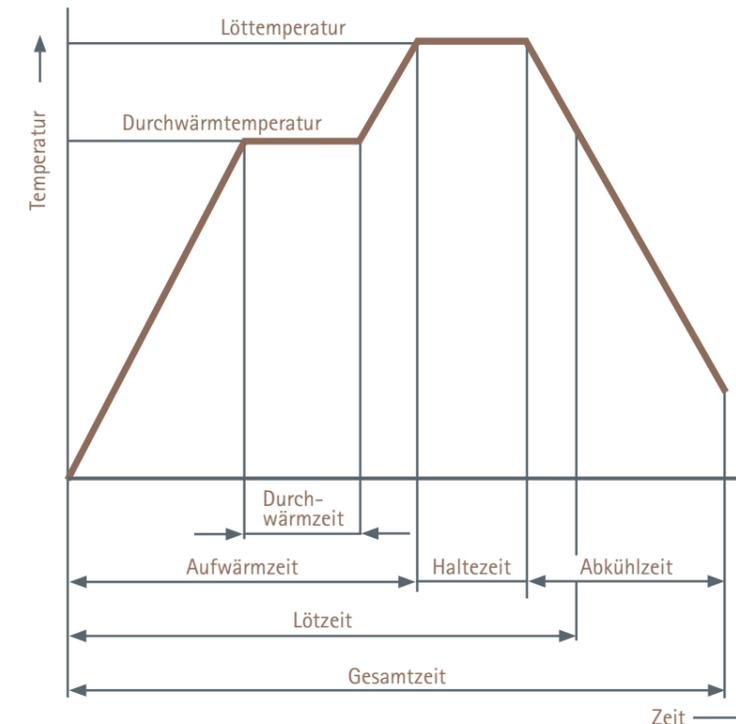


Abbildung 13 - Charakteristische Temperaturen und Zeiten beim Löten [20]

4.2. Oberflächenvorbereitung

Um eine qualitativ hochwertige Lötverbindung von metallischen Werkstoffen zu erhalten, muss eine sorgfältige Oberflächenbehandlung vorgenommen werden. Chemische, mechanische, thermische oder eine Kombination aus diesen Reinigungsverfahren stehen dafür zur Auswahl (siehe Tabelle 12). Die zu lötenden Teile müssen sauber und frei von benetzungshemmenden Rückständen wie z. B. Oxide, Öl, Fett, Schmutz, Rost, Farben, Schneidemulsionen usw. sein (siehe Abbildung 14). Das Benetzungsverhalten des Lotes ist außerdem von folgenden Faktoren abhängig:

die Eigenschaften von Grundwerkstoff, Lot und weiteren Hilfsmitteln, die Oberflächenbeschaffenheit sowie die Wärmezuführung beim Lötprozess. Der Zeitraum zwischen Reinigung und Lötung sollte möglichst kurz sein. Die gereinigten Bauteile sind vor Neuverschmutzung und Handschweiß zu schützen. Eine Lagerung in inerte und trockener Atmosphäre ist von Vorteil. Folgende Maßnahmen dienen zur Vorbereitung von Kupferoberflächen je nach Art und Umfang der Verschmutzung, Reinheitsanforderungen sowie die Geometrie der zu reinigenden Oberflächen [21].

In Tabelle 13 sind Vorschläge für das Beizen von Kupferwerkstoffen aufgeführt. Eine vorangehende Entfettung und eine anschließende Spülung sind dabei immer notwendig. Das DVS Merkblatt 2606 (2000) enthält weitere Empfehlungen für mögliche Oberflächenvorbereitungen [21].

Reinigungsverfahren	Beispiel
Chemische Reinigung	Entfetten mit handelsüblichen Lösungsmitteln (z. B. Isopropanol, Aceton); Dampfentfettung mit Kohlenwasserstoffen und chlorierten Kohlenwasserstoffen; Alkalische Reinigung mit wässrigen Lösungen, Emulsionsreinigung mit Mischungen aus Kohlenwasserstoffen, Fettsäuren, benetzenden Mitteln und Oberflächenaktivatoren; Beizbehandlungen z. B. mit Säuren, Säuregemischen oder Salzen (siehe Tabelle 13)
Mechanische Reinigung	Schleifen, Feilen, Strahlen, Polieren Achtung: bei Kupferwerkstoffen dürfen keine Stahldrahtbürsten verwendet werden!
Thermische Reinigung	Reinigung in reduzierender Atmosphäre z. B. Wasserstoff, Flußsäure bei Temperaturen über 800 °C

Tabelle 12 - Reinigungsverfahren für Kupferwerkstoffe [21]

Werkstoff	Bemerkung	Beizvorschlag
Kupfer-Chrom-Legierungen		mit heißer Schwefelsäure (H ₂ SO ₄), aufeinanderfolgendes Eintauchen in zwei Lösungen: I. 65 ml 96 %ige Schwefelsäure (H ₂ SO ₄) mit H ₂ O auf 100 ml Lösung verdünnen, Anwendung der Lösung im heißen Zustand II. 3 ml 96 %ige Schwefelsäure (H ₂ SO ₄) mit H ₂ O auf 100 ml Lösung verdünnen
Kupfer/ Kupferlegierungen	Oxide vorher evtl. mechanisch entfernen (Kupfer-/ Messingdrahtbürste, Schmirgel)	a) 5 ml 96 %ige Schwefelsäure (H ₂ SO ₄) mit H ₂ O auf 100 ml Lösung verdünnen b) 50 ml 65 %ige Salpetersäure (HNO ₃) mit H ₂ O auf 100 ml Lösung verdünnen
Kupfer-Aluminium-Legierungen	eventuell Beschichten vor dem Löten notwendig	aufeinanderfolgendes Eintauchen in zwei Lösungen I. 2 ml 40 %ige Flußsäure (HF) mit 3 ml 96 %iger Schwefelsäure (H ₂ SO ₄) mit H ₂ O auf 100 ml Lösung verdünnt II. 2 g Natriumdichromat (Na ₂ Cr ₂ O ₇) und 5 ml 96 %ige Schwefelsäure (H ₂ SO ₄) mit H ₂ O auf 100 ml Lösung verdünnt
Kupfer-Nickel-Legierungen	Oxide vorher evtl. mechanisch entfernen (Kupfer-/ Messingdrahtbürste, Schmirgel)	mit heißer Schwefelsäure (H ₂ SO ₄) aufeinanderfolgendes Eintauchen in zwei Lösungen I. 65 ml 96 %ige Schwefelsäure (H ₂ SO ₄) mit H ₂ O auf 100 ml Lösung verdünnen, Anwendung der Lösung im heißen Zustand II. 3 ml 96 %ige Schwefelsäure (H ₂ SO ₄) mit H ₂ O auf 100 ml Lösung verdünnen
Kupfer-Silizium-Legierungen	Oxide vorher evtl. mechanisch entfernen	aufeinanderfolgende Behandlung mit folgenden Lösungen: I. 5 ml 65 %ige Salpetersäure (HNO ₃) mit H ₂ O auf 100 ml Lösung verdünnen II. 2 ml Flußsäure (HF) und 3 ml 65 %ige Salpetersäure (HNO ₃) mit H ₂ O auf 100 ml Lösung verdünnen III. 2 g Natriumdichromat (Na ₂ Cr ₂ O ₇) und 3 ml 65 %ige Salpetersäure (HNO ₃) mit H ₂ O auf 100 ml Lösung verdünnen
Kupfer-Zink-Legierungen	Oxide vorher evtl. mechanisch entfernen (Kupfer-/ Messingdrahtbürste, Schmirgel)	aufeinanderfolgendes Eintauchen in zwei Lösungen I. 5 ml 96 %ige Schwefelsäure (H ₂ SO ₄) mit H ₂ O auf 100 ml Lösung verdünnt II. 2 g Natriumdichromat (Na ₂ Cr ₂ O ₇) und 3 ml 96 %ige Schwefelsäure (H ₂ SO ₄) mit H ₂ O auf 100 ml Lösung verdünnt

Tabelle 13 - Beizvorschläge für Kupfermaterialien für das flussmittelfreie Hartlöten [21]

4.3. Oberflächenaktivierung

Für die Herstellung einer qualitätsge- rechten Lötverbindung ist der Kontakt zwischen Lot und Metalloberfläche notwendig. Der Kontakt zwischen dem schmelzflüssigen Lot und der Oberfläche erfolgt jedoch nicht in jedem Fall. In Abbildung 14 ist der reale Aufbau einer technischen Oberfläche dargestellt. Es sind Verunreinigungen und Schichten auf der Oberfläche vorhanden, die vor dem Löten entfernt werden müssen. Der hierzu notwendige Schritt wird als Oberflächen-

aktivierung bezeichnet. Zu den häufigsten Methoden zählt dabei die Verwendung von Flussmitteln, das Löten unter reduzierendem Schutzgas und das Löten unter Vakuum. Weitere Aktivierungsmög- lichkeiten sind Löten unter inertem Schutzgas, Lichtbogenlöten und Löten mit mechanischer Aktivierung z. B. beim Ultraschall- und Reiblöten. In allen Aktivierungsverfahren werden feste, flüssige oder gasförmige Schichten absorbiert.

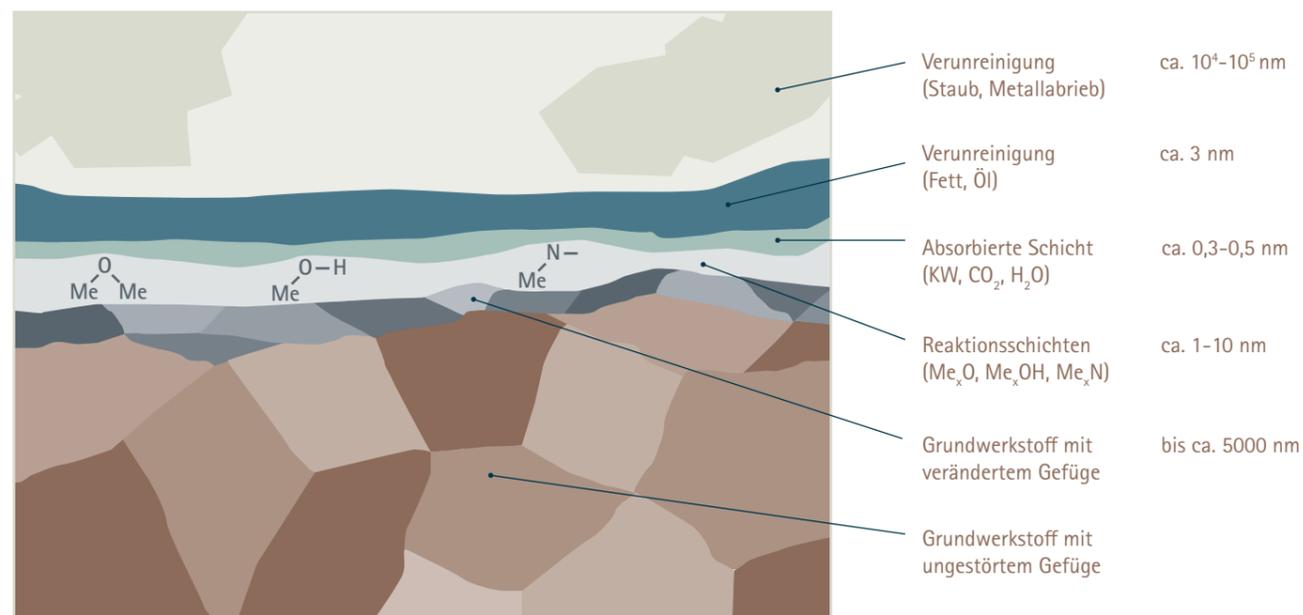


Abbildung 14 - Schematischer Aufbau technischer Oberflächen [22]

4.3.1. Flussmittel

Nach DIN ISO 857-2 (2007) ist Flussmittel ein „nicht-metallischer Stoff, der, wenn geschmolzen, das Benetzen unterstützt, indem vorhandene Oxide oder schädliche Belege von den zu fügenden Oberflächen entfernt werden und ihre Neubildung während des Fügevorgangs verhindert wird“ [10]. Flussmittel kann als Pulver, Paste und Flüssigkeit oder als Lot-Fluss- mittel-Mischung vorliegen.

Der Schmelzbereich des Flussmittels sollte ca. 50 °C unter dem des verwendeten Lotes sein, so dass die Oberfläche vor dem Benetzen und Fließen des Lotes aktiviert ist. Es gibt kein Universalfluss- mittel, deshalb muss die Zusammensetzung genau der Löttaufgabe angepasst sein [1]. Es wird zwischen Flussmittel für das Weichlöten DIN EN 29454-1 (2004) sowie für das Hartlöten DIN EN 1045 (1997) unterschieden.

Flussmittel zum Weichlöten nach DIN EN 29454-1 (1994)

Beim Weichlöten ist meistens ein Flussmittel erforderlich. Die Flussmittel unterscheiden sich beim Weichlöten nach ihrer chemischen Zusammensetzung [4].

In der Praxis werden Flussmittel zum Weichlöten auch nach ihrer chemischen Wirkung unterschieden.

Flussmitteltyp	Flussmittelbasis	Flussmittel-aktivator	Flussmittelart	Anwendung
[1] Harz	[1] mit Kolophonium [2] ohne Kolophonium	[1] ohne Aktivator [2] mit Halogenen aktiviert (auch andere Aktivierungs- mittel sind möglich) [3] ohne Halogenen aktiviert	[A] flüssig	E-Technik Elektronik
[2] organisch	[1] wasserlöslich [2] nicht wasserlöslich			E-Technik Elektronik Metallwaren
[3] anorganisch	[1] Salze	[1] mit Ammoniumchlorid [2] ohne Ammonium- chlorid	[B] fest	Klempnerarbeiten Cu, Cu-Legierungen Ni, Ni-Legierungen Edelmetalle
	[2] Säuren	[1] Phosphorsäure [2] andere Säuren	[C] Paste	Cr, Cr-Ni- Legierungen Edelstähle
	[3] alkalisch	[1] Amine und/oder Ammoniak		

Tabelle 14 - Flussmittel zum Weichlöten nach DIN EN 29454-1 (1994) [23]

Art der Flussmittel	Wirkweise	Chemische Wirkung
Korrodiierend wirkende Flussmittel	auf Basis von Zinkchlorid	Rückstände verursachen Korrosion bei Kupfer- werkstoffen (Lochfraß); Werkstücke müssen nach dem Löten mit Salzsäure gewaschen und mehrfach mit Wasser gespült werden
Nicht korrodiierend wirkende Flussmittel	auf Basis von Zinkbromid	Rückstände können auf dem Werkstück bleiben oder mit Wasser abgespült werden
Nicht korrodiierend wirkende, rückstandsfreie Flussmittel	auf Basis von organischen Aminen und Bromwasserstoffsäure	Flussmittel verdampfen vollständig und hinter- lassen eine saubere Oberfläche bei optimaler Temperaturführung. Anschließende Reinigung des Werkstücks entfällt

Tabelle 15 - Chemische Wirkung der Flussmittel zum Weichlöten [24]

Flussmittel zum Hartlöten nach DIN EN 1045 (1997)

In dieser Norm sind die Flussmittel in zwei Klassen eingeteilt: FH und FL. Klasse FH umfasst Flussmittel für das Hartlöten von Schwermetallen wie Stählen, rostfreien Stählen, Kupfer und Kupferlegierungen, Nickel und Nickellegierungen,

Edelmetallen, Molybdän und Wolfram. Die Klasse FL ist für das Hartlöten von Leichtmetallen, wie z. B. Aluminium und Aluminiumlegierungen, geeignet. Für das Hartlöten von Kupfer und Kupferlegierungen sind nur die Flussmittel der Klasse FH vorgesehen.

Typ	Wirktemperaturbereich	Löttemperatur	Beschreibung / Anwendung	Nachbehandlung
FH10	ca. 550 – 800 °C	> 600 °C	enthält Borverbindungen; einfache und komplexe Fluoride; Vielzweckflussmittel	Rückstände: korrosiv; Entfernung: Waschen oder Beizen
FH11	ca. 550 – 800 °C	> 600 °C	enthält Borverbindungen; einfache und komplexe Fluoride sowie Chloride; überwiegende Verwendung bei Kupfer-Aluminiumverbindungen	Rückstände: korrosiv; Entfernung: Waschen oder Beizen
FH12	ca. 550 – 850 °C	> 600 °C	enthält Borverbindungen, elementares Bor sowie einfache und komplexe Fluoride; überwiegende Verwendung bei rostfreien, hochlegierten Stählen, Hartmetalle	Rückstände: korrosiv; Entfernung: Waschen oder Beizen
FH20	ca. 700 – 1000 °C	> 750 °C	enthält Borverbindungen; einfache und komplexe Fluoride; Vielzweckflussmittel	Rückstände: korrosiv; Entfernung: Waschen oder Beizen
FH21	ca. 750 – 1100 °C	> 800 °C	enthält Borverbindungen; Vielzweckflussmittel	Rückstände: nicht korrosiv; Entfernung: mechanisch oder Beizen
FH30	> 1000 °C		enthält Borverbindungen, Phosphate und Silikate; kommen meist beim Gebrauch von Kupfer- u. Nickellöten zum Einsatz	Rückstände: nicht korrosiv; Entfernung: mechanisch oder Beizen
FH40	ca. 600 – 1000 °C		enthält Chloride und Fluoride, Borfrei; findet Anwendung wo die Anwesenheit von Bor nicht erlaubt ist	Rückstände: korrosiv; Entfernung: Waschen oder Beizen

Tabelle 16 - Flussmittel zum Hartlöten nach DIN EN 1045 (1997) [25]

Die Tabelle 17 beinhaltet verschiedene Stoffe, welche in einigen Flussmitteln enthalten sind. Seit dem 01.12.2010 ist darauf zu achten, dass diese Stoffe in den angegebenen Mengen als „Fortpflanzungsgefährdend Kategorie 1B“ eingestuft werden. Die gefährdenden Artikel sind markiert mit dem Symbol „T“ und den R-Sätzen R60 und R61. Tri-methylborathaltige Produkte (EG-Nummer: 204-468-9)

sind von der gesetzlichen Regelung nicht betroffen, jedoch ist zu beachten, dass bei der Verarbeitung gasförmiger Flussmittel in der Brennflamme Borsäure entsteht und sich diese auf dem Werkstück sowie im Arbeitsbereich niederschlägt. Borsäureniederschlag ist ebenfalls giftig. Aus diesem Grund gelten ab dem Zeitpunkt der Verarbeitung die gleichen Vorschriften wie für borsäurehaltige

Hartlötflussmittel [26]. Weitere Informationen zur „Neueinstufung und Etikettierungsvorschriften für Flussmittel zum Hartlöten, die Borsäure, Boraxpentahydrat oder di-Bortrioxid enthalten“ lassen sich dem DVS Merkblatt 2617 [26] entnehmen. Tabelle 17 gibt außerdem die entsprechenden Grenzgehalte für die Gefahreinstufung an.

Stoff	EG-Nummer	Gehalte für die Einstufung
Borsäure	233-139-2 234-343-4	≥ 5,5 %
di-Bortrioxid	215-125-8	≥ 3,1 %
di-Natriumtetraborat, wasserfrei	215-540-4 235-541-3 237-560-2	≥ 4,5 %
di-Natriumtetraborat-Decahydrat	215-540-4	≥ 8,5 %
di-Natriumtetraborat-Pentahydrat	215-540-4	≥ 6,5 %

Tabelle 17 - Gehalte für Gefahreinstufung [26]

4.3.2. Schutzatmosphäre

Die Schutzatmosphäre zum Löten ist nach DIN ISO 857-2 (2007), die „Gasatmosphäre oder Vakuummhülle um ein Bauteil herum, um die Oxide oder andere schädliche Beläge auf der Oberfläche zu beseitigen oder die Neubildung solch eines Belages auf

Oberflächen, die vorher gesäubert wurden, zu verhindern“ [10]. Durch die Schutzatmosphäre wird z. B. eine hohe Qualität der Lötverbindung, eine gute Steuerung/Kontrolle von Löttemperaturen und Lötzeiten, hohe Produktivität des Leistungsprozesses durch ggf. Wegfall von Auftrag

und Entfernung von Flussmitteln erreicht. Nachteilig sind die Prozess- und Anlagenkosten. Tabelle 18 zeigt Beispiele und Definitionen der verschiedenen Schutzatmosphären zum Löten auf.

Atmosphäre	Schutzgas		Vakuum
	reduzierend	inert	
Definition nach DIN ISO 857-2 (2007)	„Gas, das Oxide reduziert“ [10]	„Gas, das während des Weich- oder Hartlötprozesses die Bildung von Oxiden ausreichend verhindert“ [10]	„ausreichender Druck unterhalb des Atmosphären-Druckes, so dass aufgrund des niedrigen Partialdruckes des verbleibenden Gases die Bildung von Oxiden in einem für das Weich- oder Hartlöten in ausreichendem Maß verhindert wird“ [10]
Beispiel	Exo- (teilverbrannte Gasgemische, welche mit ausreichender Luftzufuhr verbrannt werden) und Endogase (teilverbrannte Gasgemische, welche mit geringer Luftzufuhr endotherm verbrannt werden), Ammoniak-Spaltgas	Argon, Helium	Grob-, Fein-, Hoch- und Ultrahochvakuum

Tabelle 18 - Schutzatmosphären zum Löten

4.4. Lotapplikation

Beim Lötten muss neben der Oberflächenreinigung und -aktivierung auch die richtige Lotzuführung ausgewählt werden. Meist wird die Lotapplikation durch die Konstruktion vorgegeben. Den Bauteilen kann das Lot beispielsweise von Hand, mittels Tauchen in flüssiges Lot oder durch Lotformteile, die vor dem

Löten an den zu fügenden Stellen positioniert werden, zugeführt werden. In Abhängigkeit von Lötspalt und Anordnung des Lötdepots kann das Lot in verschiedenen Formen (z. B. Draht, Band, Folie) und Abmessungen vorliegen.

Tabelle 19 zeigt einige Möglichkeiten der Lotzuführung.

Möglichkeiten der Lotzuführung

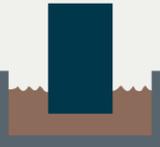
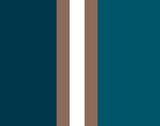
	<p>Löten mit angesetztem Lot Methode, bei dem die Bauteile an der Lötstelle auf Löttemperatur erwärmt werden. Das Lot wird durch Berührung mit den zu fügenden Teilen zum Schmelzen gebracht.</p>
	<p>Löten mit deponiertem oder eingelegtem Lot Methode, bei dem das Lot vor Erwärmung auf Löttemperatur an der Lötstelle angebracht bzw. in ein Lötdepot eingebracht wird, um gemeinsam mit den Bauteilen erwärmt zu werden.</p>
	<p>Lötbadlöten Methode, bei dem die zu fügenden Bauteile in ein Bad aus flüssigem Lot getaucht werden.</p>
	<p>Löten mit lotbeschichteten Teilen Methode, bei dem das Lot vor der Erwärmung z. B. durch Walzplattieren, Galvanisieren, in einer Dampfphasenabscheidung oder durch Verzinnen aufgebracht wird.</p>

Tabelle 19 - Möglichkeiten der Lotzuführung nach [10]

4.5. Verfahren

Die Einteilung der Lötverfahren kann verschieden erfolgen, zum Beispiel nach Art der Energieträger (siehe Tabelle 20). Weitere Klassifikationen erfolgen nach Art:

- der Lötstelle (Auftragslöten, Spaltlöten, Fugenlöten)
- der Oxidbeseitigung (z. B. Schutzgaslöten, Vakuumlöten, Löten mit Hilfe von Flussmitteln)
- der Lotzuführung (z. B. Tauchlöten, Löten mit angesetztem Lot)
- der Fertigung (z. B. Handlöten, teilmechanisiertes Löten, automatisches Löten)

Prozess	Art der Energieträger	Verfahren	
Weichlöten	Löten durch festen Körper	· Kolbenwechlöten	
	Löten durch festen Körper	· Lötbadwechlöten · Wellenwechlöten · Schleppwechlöten	
	Löten durch Gas	· Flammwechlöten	
	Löten durch elektrischen Strom	· Induktionswechlöten an Luft	
	Ofenlöten	· Ofenwechlöten	
Hartlöten	Löten durch Flüssigkeit	· Lötbadhartlöten	
	Löten durch Gas	· Flammenhartlöten	
	Lichtbogenlöten	· Lichtbogenhartlöten von Hand · (MIG, WIG, Plasma)	
	Löten durch Strahl	· Laserstrahlhartlöten · Elektronenstrahlhartlöten	
	Löten durch elektrischen Strom	Induktionshartlöten	· Induktionshartlöten in einer geschützten Atmosphäre
		Indirektes Widerstandslöten	· Indirektes Widerstandslöten
		Direktes Widerstandslöten	· Ofenhartlöten in reduzierendem Schutzgas · Ofenhartlöten in inertem Schutzgas · Ofenhartlöten im Vakuum

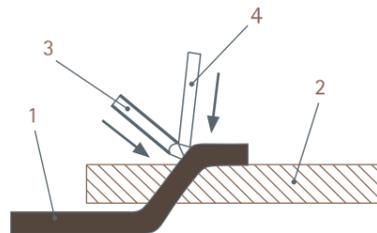
Tabelle 20 - Einteilung der Verfahren nach [10]

4.5.1. Kolbenlöten

Das Kolbenlöten ist ein Weichlötverfahren. Die Energieträger sind dabei feste Stoffe. Die Erwärmung der Lötstelle und das Abschmelzen des Lotes erfolgt mittels eines LötKolbens, der von Hand oder maschinell geführt wird. Für Spaltlötlösungen mit langer Überlappung ist er jedoch nicht verwendbar.

Die meisten LötKolben besitzen eine eingebaute Wärmequelle in Form eines elektrischen Heizelementes oder eines Brenners für Erdgas, Acetylen oder Propan. Wärmekapazität und Form des LötKolbens sowie der Lötspitze müssen dem Lötteil angepasst sein. Ein spitzer Winkel der letzteren gewährleistet eine bessere Zugänglichkeit der Lötstelle, verursacht jedoch höhere Wärmeverluste. Die Masse der Lötspitzen liegt zwischen 20 g und 1 kg, welche früher wegen des guten Wärmetransports und der guten Benetzbarkeit fast ausschließlich aus Kupfer bestanden. Da aufgrund der Kupferlöslichkeit von Zinnlot die Lötspitzen bei Massnlötungen oft nachzubessern oder auszutauschen waren, wurden kupferhaltige Lote bzw. mit anderen Werkstoffen plattierte Lötspitzen entwickelt. Beim Löten mit bleifreien Loten muss darauf geachtet werden, dass der LötKolben schneller abgezogen wird, um ein Festfrieren oder Ausziehen vom Lot zu verhindern, denn im Vergleich zu SnPb-Loten haben die heute verwendeten Lote ein anderes Fließverhalten. Die Spanne zwischen schmelzflüssigem und festem Zustand ist geringer, so dass das Erstarren des Lotes rascher erfolgt [6].

Die Lötzeit des Verfahrens liegt meist unter 60 Sekunden. Es wird je nach Anwendung eine Heizleistung von 15 – 2000 W benötigt. Der Kolben kann dabei Temperaturen von 200 – 600 °C erreichen [6].



1. Leiter 2. aufgedruckter Schaltkreis
3. Lötspitze 4. Röhrenlot

Abbildung 15 – Weichlötbeispiel Kolbenlöten (Leiterplatte) nach [10]

Vorteile

- geringe Kosten
- reproduzierbar
- geeignet für schwerzugängliche Lötstellen
- geeignet für temperaturempfindliche Bauteile
- Einzellötung

Nachteile

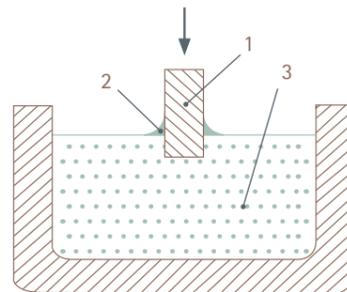
- Verzunderung der Lötspitze
- setzt gute Handfertigkeit des Lötpersonals voraus

Tabelle 21 – Vor-/Nachteile vom Kolbenlöten

4.5.2. Lötbadtauchlöten

Das Lötbadtauchlöten ist geeignet für Weich- und Hartlötverfahren. Die zu lötenden Teile werden mechanisch gereinigt, positioniert und mit Flussmittel versehen, bevor sie in ein Bad aus geschmolzenem Lot getaucht werden. Die Temperatur des Tauchbades soll 60 bis 100 K über der Liquidustemperatur des Lotes liegen. Bei höheren Temperaturen kommt es zu einer verstärkten Oxidbildung auf der Badoberfläche. Des Weiteren besteht die Gefahr des Bauteilverzuges sowie einer erhöhten

Erosion des Grundwerkstoffes. Die Verweilzeit im Tauchbad beträgt meist zwischen 20 bis 60 Sekunden. Es ist wichtig, auf die Eintauchgeschwindigkeit zu achten. Diese sollte so gewählt werden, dass die Löttemperatur in jeder Tauchphase am Werkstück erreicht wird. Eine Einschätzung dazu kann über den positiven Meniskus an der Lotbadoberfläche und dem zu lötenden Teil vorgenommen werden. Für größere Bauteile empfiehlt sich ein Vorwärmen, da beim Eintauchen der Teile in das Lotbad zu viel Wärme entzogen wird und damit die Badtemperatur absinkt. Typische Einsatzgebiete des Tauchlötens sind z. B. im Kühler- und Behälterbau zu finden [16].



1. Werkstück 2. Hohlkehle 3. Lotbad

Abbildung 16 – Lötbadweichlöten nach [10]

Vorteile

- vollautomatisiert
- Lotauftrag und Aufschmelzung in einem Arbeitsgang
- gute Wirtschaftlichkeit

Nachteile

- teilweise hohe thermische Belastung des Bauteils
- hoher Wartungsaufwand

Tabelle 22 – Vor-/Nachteile des Lotbadtauchlötens

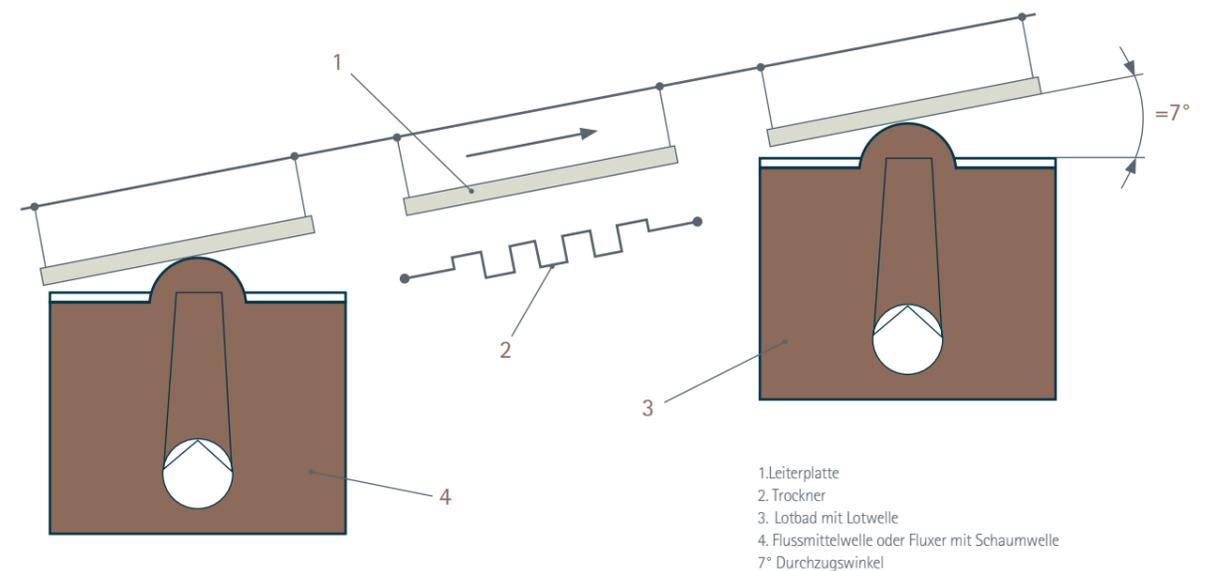
Wellen-/Schwalllöten

Das Wellen- bzw. Schwalllötverfahren gehört zum Weichlötprozess. Meist wird es zum Auflöten aufgedruckter Schaltkreise auf Leiterplatten benutzt.

Der Vorgang erfolgt in vier Stufen über ein Transportsystem von Station zu Station. Zu Beginn wird das Flussmittel auf die Baugruppe aufgebracht. Im zweiten Schritt erfolgt die Vorheizung mittels einer Konvektionsheizung oder eines Infrarotstrahlers, um die unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit und Wärmeausdehnung der in der Baugruppe bzw. auf der Leiterplatte befindlichen Werkstoffe auszugleichen. In der Schaltplatine sind z. B. Epoxide, welche durch ihre schlechte Wärmeleitung das Erwärmen auf höhere Temperaturen erschweren. Das Laminat der Platine wirkt somit kühlend auf die anliegenden Metallteile und macht eine homogene Aufheizung auf Löttemperatur unmöglich. Des Weiteren verdampft das Flussmittel und es erfolgt ein Temperaturanstieg der

thermisch empfindlichen Bauteile. Es ist zu berücksichtigen, dass bei Infrarotstrahlung die glänzenden Metallteile bis zu 96 % der Strahlung reflektieren und das Aufwärmen dadurch erschwert wird. Die Lötung der Bauteile findet statt, indem die Baugruppe über einen Schwall bzw. die Lötwellen geführt wird. Die Abkühlung erfolgt im Anschluss unter Umgebungsbedingungen oder aktiv [27]. Ein Durchzugswinkel der Leiterplatten zur Badoberfläche von 7 ° hat sich als günstig erwiesen [10].

Das **Schleplötens** ist eine Variante des Wellenlötens. Der Unterschied besteht in der Durchführung. Die Lotaufbringung auf das Bauteil erfolgt nicht durch eine Lotwelle, sondern durch das Eintauchen in ein Lotbad. Der Ein- und Ausfahrtswinkel des Bauteils in das Bad kann z. B. 8 ° bis 10 ° betragen, während die Eintauchtiefe meist etwa der Hälfte der Plattendicke entspricht. Zum Entfernen der Oxide von der Oberfläche des Lotbades dient ein fest montierter Stab [10].



1. Leiterplatte
2. Trockner
3. Lotbad mit Lotwelle
4. Flussmittelwelle oder Fluxer mit Schaumwelle
7° Durchzugswinkel

Vor-/Nachteile des Wellenlötens siehe Lotbadtauchlöten.

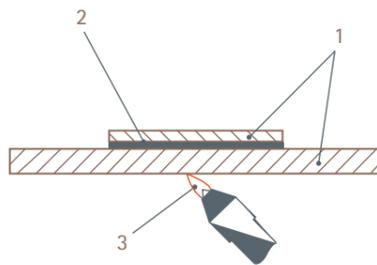
Abbildung 17 – Wellenweichlöten nach [10]

4.5.3. Flammlöten

Das Flammlöten kann als Weich- oder Hartlötprozess manuell, aber auch maschinell durchgeführt werden. Es wird mit einem Brenngas gearbeitet, z. B. Acetylen. Über einen Druckminderer wird dieses Gas einem speziellen Brenner zugeführt. Die Wahl des Brenners richtet sich nach Werkstück, Werkstoff und Brenngas. Zu Beginn wird das Flussmittel auf die gereinigten, zu lötenden Flächen aufgetragen. Ein ausreichender Lötspalt muss dabei zur Verfügung stehen. Zu lötende Teile müssen gegen Verrutschen gesichert werden (fixiert). Die Werkstücke sollten an der Lötstelle und deren Umgebung vorgewärmt sein, damit das Lot gut fließen kann. Auf kalten Lötbereichen kugelt das Lot bzw. zieht sich zusammen, d. h. es findet keine Benetzung statt. Das Vorwärmen erfolgt neutral oder mit einer reduziert eingestellten Flamme.

Das Lot wird manuell in Stab- oder Drahtform zugeführt. Wird eingelegetes Lot (z. B. als Lotformteil) genutzt, setzt das eine lötgerechte Auswahl sowie eine konstruktive Gestaltung des Lotdepots voraus. Im Allgemeinen ist die Lötzeit nicht über drei Minuten anzusetzen. Die Flamme darf nicht direkt auf die Lötstelle gerichtet sein, weil sonst das Flussmittel geschädigt wird. Nach dem Lötvorgang müssen die meisten Flussmittel entfernt werden. Für Kupfer-Kupfer-Verbindungen sind phosphorhaltige Lote geeignet, weil bei diesen auf das Flussmittel verzichtet werden kann. Entsprechende Lote sind den jeweiligen Normen DIN EN ISO 17672 (2010) für Hartlote, DIN 1707-100 (2011) und DIN EN ISO 9453 (2014) für Weichlote zu entnehmen. Das Flammverfahren findet z. B. Anwendung in der Kälte- und Klimatechnik, dem Klein- und Großapparatbau, Sanitär- und Heizungsinstallation sowie Gas- und Wasserinstallation. Bei letzterem sind wichtige Informationen dem DVGW Arbeitsblättern GW2 und

GW7 zu entnehmen. Beispielsweise gelten besondere Bestimmungen bei der Trinkwasserinstallation: Kupferrohre größer als 28 x 1,5 mm dürfen nur durch Hartlöten gefügt werden [28] [29].



1. Bauteile 2. Flussmittel und Lot 3. Flamme
Abbildung 18 – Flammweichlöten nach [10]

Vorteile

- leicht mechanisierbar
- geringe Anlagenkosten

Nachteile

- Arbeit mit offener Flamme
- meist ist eine Fixiervorrichtung notwendig
- Intensive Vor-/Nachbehandlung des Bauteils

Tabelle 23 – Vor-/Nachteile Flammlöten

4.5.4. Ofenlöten

Beim Ofenlöten können die Lötprozesse Weich- und Hartlöten durchgeführt werden. Es wird unterschieden zwischen Schutzgas- und Vakuumlötofen. Luft wird als Atmosphäre selten verwendet.

Es gibt einige Vorteile gegenüber anderen Lötverfahren, z. B. bleiben Lötteile spannungs- und verzugsfrei, weil eine gleichmäßige Erwärmung und Abkühlung

stattfindet (Werkstoff und Werkstückgeometrien sind dabei zu beachten). Der Temperatur-Zeit-Verlauf lässt sich gut steuern. Werkstücke mit komplizierten Formen und beliebig vielen Lötstellen lassen sich einwandfrei fügen. Außerdem können Wärmebehandlung und Löten in einem Arbeitsschritt erfolgen. Es sollte auf ein enges Schmelzintervall der Lote geachtet werden, um Lotseigerungen und Erosionen zu vermeiden [6].

Der Schutzgasofen (mögliche Schutzgase: z. B. Argon, Helium, Stickstoff, Wasserstoff, Kohlenstoffmonoxid) eignet sich für die Massenfertigung von Teilen mit mehreren Lötverbindungen, beispielsweise im Kühlanlagen und Fahrzeugbau sowie beim Löten von Wärmetauschern [6].

Verwendete Ofenvarianten sind z. B. Muffel-, Durchstoß- und Durchlauföfen. Die Ofentemperatur sollte je nach Lot ca. 50 °C über der Löttemperatur liegen. Zu beachten ist eine gründliche Reinigung der Lötstellen. Das Löten von Messing ist nur unter Verwendung von Flussmittel möglich [6].

Das Vakuumlöten ist ein flussmittelfreies Verfahren für Bauteile mit qualitativ höchstem Anspruch und wird z. B. im Flugzeugbau, der Luft- und Raumfahrttechnik, Elektronik, Automobilbau, Werkzeugindustrie, Apparatebau sowie Energietechnik angewendet. Auch hier existieren verschiedene Bauweisen des Ofens. Es gibt strahlerbeheizte Glasrezipienten, Widerstands- und induktiv beheizte Einkammeröfen. Das Löten erfolgt im Fein- (1...10⁻³ mbar) und Hochvakuum (10⁻³...10⁻⁷ mbar). Die Heizleistung der verwendeten Öfen beträgt, mit Ausnahme von Sonderfällen, meist zwischen 50 – 500 kW. Vor Beginn der Lötung muss die Heizkammer gereinigt sein und deren Beschickung stattfinden. Dann erfolgt ein schnelles Hochheizen auf ca. 50 °C unterhalb der

Solidustemperatur. Zum Temperaturausgleich wird diese Temperatur kurz gehalten. Anschließend erfolgt ein schnelles Heizen auf $\approx 20 - 30$ °C über die Löttemperatur des Lotes. Die Löttemperatur muss je nach Bedarf ca. 5 – 20 min gehalten werden. Um die Prozesszeiten zu verkürzen, kann das Aufheizen und Abkühlen auch unter Schutzgasatmosphäre durchgeführt werden. Das Vakuum im Ofenraum wird dann bei höheren Temperaturen erzeugt [6].



Abbildung 19 – Vakuumlötofen [30]

Eine weitere Möglichkeit der Klassifizierung besteht entsprechend der verwendeten Zusätze wie folgt:

Ofenlöten unter Verwendung:

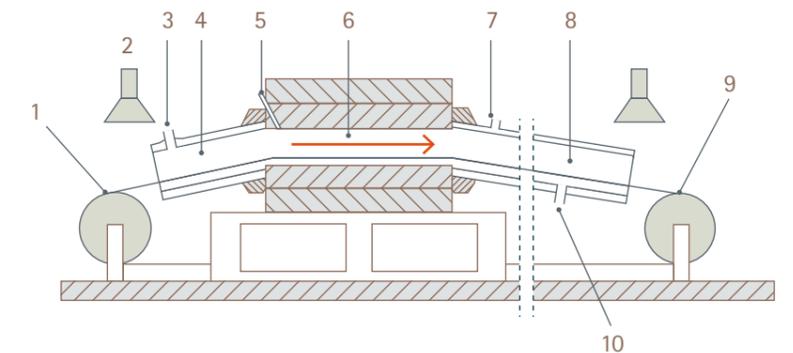
- von Flussmitteln
- von Flussmitteln und Schutzgas
- von reduzierendem Schutzgas (z. B. Wasserstoff)
- von inertem Schutzgas (z. B. Argon, Helium) [6].

Medium	Vakuum	Reduzierendes Schutzgas	Inertes Schutzgas	Flussmittel
Flussmittel		X	X	X
Reduzierendes Schutzgas			X	
Inertes Schutzgas	0	X		
Vakuum	X			

X – gleichzeitige Anwendung

0 – nacheinander folgende Anwendung

Tabelle 24 – Aktivierungsmöglichkeiten beim Ofenlöten



1. Beschickung 2. Abzug 3. Schutzgasaustritt 4. Vorwärmzone 5. Schlauchloch
6. Lötzone 7. Kühlwasser 8. Kühlzone 9. Entnahme 10. Schutzgaseintritt

Abbildung 20 – Schematischer Aufbau eines Schutzgasdurchlaufofens nach [6]

Vorteile

- Spannungs- und verzugsfreie Lötteile durch gleichmäßige Erwärmung und Abkühlung
- Löten von komplexen Bauteilen
- Möglichkeit von Löten und Wärmebehandlung in einem Arbeitsgang
- gute Steuerung des Arbeitsprozesses
- mehrere Lötstellen können in einem Arbeitsgang gelötet werden

Nachteile

- alle Bereiche des Bauteils werden wärmebeeinflusst
- lange Lötzeiten
- hohe Anlagenkosten

Tabelle 25 – Vor-/Nachteile vom Ofenlöten

Reflowlöt

Das Reflowlöt gehört zu den Ofenwechlötverfahren und findet in der Elektronik Anwendung. Dieser Lötprozess hat große Bedeutung für die Surface Mount Technology (SMT), d. h. die Oberflächenmontage von Bauteilen auf Platinen und Leiterplatten. Für diese

Verbindungen werden pastenförmige Lote benötigt, die z. B. aus SnAgCu-, oder SnAg-Legierungen bestehen. Das Lotpastendepot wird in einer Reflowlötanlage aufgeschmolzen und stellt eine stoffschlüssige Verbindung zwischen Bauelementen und der Leiterplatte her (siehe Abbildung 21).

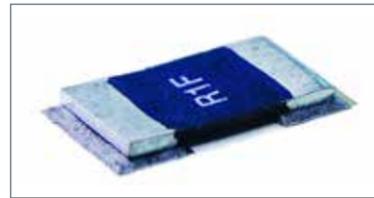


Abbildung 21 - Bestücktes Bauelement vor dem Umschmelzen der Pastendepots [31]

	Licht/Strahlung		Konvektion		Kondensation	Wärmeleitung
	Infrarot	Laser	Luft	Stickstoff		
Simultanes Verfahren	X		X	X		
Simultanes Batch Verfahren					X	X
Sequentielles Verfahren		X				
Wärmeübertragung in Bezug auf die Baugruppe (BG) (im Vergleich zueinander)	Große Energiedichte	Sehr große Energiedichte	Homogen	Homogen	Homogen	Teilweise inhomogen, wenn kein planarer Kontakt zur BG vorliegt
Maximal erreichbare Temperatur in Bezug auf die Temperatur TP auf der Baugruppe	T_p kann leicht überschritten werden	T_p kann leicht überschritten werden	T_p ist sehr gut kontrollierbar (max. Gas-temperatur ≤ 350 °C)	T_p ist sehr gut kontrollierbar (max. Gas-temperatur ≤ 350 °C)	T_p ist limitiert durch Medienwahl (max. ≤ 260 °C)	T_p ist gut kontrollierbar (max. Heizplattentemperatur ≤ 350 °C)
Flexibilität der Temperaturprofilierung	Groß	Klein	Sehr groß	Sehr groß	Mittel	Mittel bis klein
Spezielle Produktanforderung	Nein	Lotpaste und Substrat müssen geeignet sein	Nein	Nein	Bauelemente-Spezifikation beachten	Plane unbestückte Kontaktfläche ist notwendig

Zur Wärmeübertragung können folgende Möglichkeiten genutzt werden: Licht/Strahlung (z. B. Infrarot), Konvektion (z. B. Stickstoff), Kondensation und Wärmeleitung. In Tabelle 26 sind einige Eigenschaften dargelegt.

Tabelle 26 - Vergleich verschiedener Prinzipien des Reflowlötens [31]

Das Konvektionslöt unter Stickstoff hat in den letzten Jahren sehr an Bedeutung gewonnen. Der Stickstoff verdrängt den Sauerstoff aus der Luft und somit auch aus der Lötanlage. Er geht keine chemischen Wechselwirkungen mit anderen Elementen ein, sondern verhindert die Ausbildung einer Oxidschicht auf der metallischen Oberfläche. Als Ergebnis liegen gute Benetzungseigenschaften vor. Von außen wird die Konvektion (Mechanismus zum Transport

von thermischer Energie) über Ventilatoren, Gebläse und Düsen forciert. Wie in Abbildung 22 ersichtlich ist, verfügt ein Konvektionssystem meist über mehrere, voneinander unabhängig einstellbare Prozesszonen. [31]

Unabhängig von der Anlagenauswahl setzt sich der Reflowprozess aus den Prozessschritten Vorwärmen, Löten und Abkühlen zusammen. Um porenfreie

Lötstellen zu erzeugen, kann nach dem Löten eine Behandlung unter Vakuum erfolgen. Dennoch kann es zu Fehlern beim Löten kommen, z. B. zur Nichtlötung, Tombstone (unterschiedliches Aufschmelzen und Benetzungsverhalten des Lotes links und rechts am Bauteilanschluss), Lotbrücken und Lotkugeln. [15] [31]

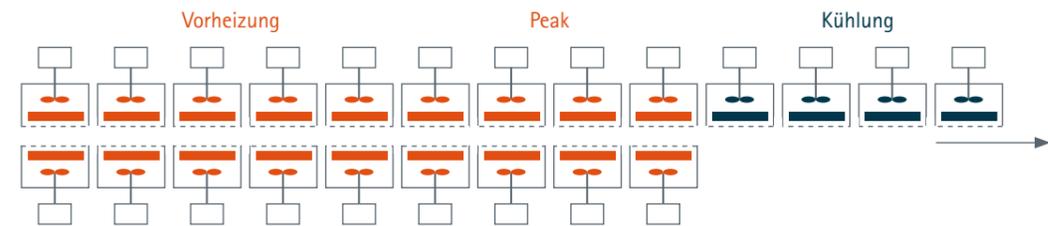


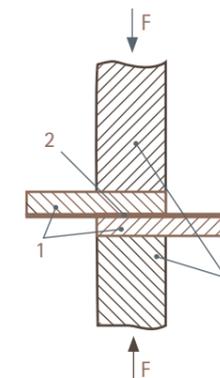
Abbildung 22 - Schema einer Konvektions-Reflowlötanlage [31]

4.5.5. Elektrisches Widerstandslöten

Das elektrische Widerstandslöten kann ein Weich- oder Hartlötprozess sein. Punkt- und flächige Fügeverbindungen können mit diesem Verfahren realisiert werden. Als Grundwerkstoffe werden z. B. Kupfer, Messing, unlegierte Stähle und Aluminium eingesetzt. Doch auch alle anderen metallischen Werkstoffe können auf diese Weise gelötet werden.

Das Lot (Lotapplikation beachten) wird vor dem Fügen im Montagespalt appliziert oder angelegt. Die zu fügenden Flächen werden durch die Elektroden (z. B. Wolfram) aufeinander gepresst. Der im Sekundärkreis des Transformators fließende Strom führt zu einer starken Erwärmung der Kontaktstellen zwischen den Fügeteilen. Diese Wärmeentwicklung führt zum Schmelzen des Lotes. Der Einsatz von Flussmittel und Schutzgasen ist je nach Anwendungsfall möglich. Lötzeiten liegen im Millisekunden- bis Sekundenbereich.

Es existieren zwei Arbeitstechniken. Zum einen das direkte Widerstandslöten, der Strom fließt über die Lötstelle. Zum anderen das indirekte Widerstandslöten. Der Strom wird über eine Elektrode dem Bauteil zugeführt, ohne über die Lötstelle zu fließen [6].



1. belotete Bauteile 2. weichzulötende Verbindung 3. Elektroden

Abbildung 23 - direktes Widerstandsweichlöten nach [10]

Vorteile

- Lötwärme nur im Bereich der Lötverbindung, benachbarte Bereiche bleiben unbeeinflusst
- kurze Lötzeiten
- geeignet für temperatur-empfindliche Bauteile

Nachteile

- Bauteilgeometrie ist zu berücksichtigen

Tabelle 27 - Vor-/Nachteile vom Widerstandslöten

4.5.6. Induktionslöten

Induktionslöten kann als Weich- oder Hartlötprozess mit Flussmittel an Luft oder unter Schutzgas stattfinden und eignet sich für alle metallischen Werkstoffe. Bevorzugt wird das Verfahren jedoch bei Kupfer, Messing, Stahl und Aluminium eingesetzt. Es sollte ein Lot mit engem Schmelzbereich oder mit einem festen Schmelzpunkt und guten Fließeigenschaften gewählt werden. Die gereinigte Lötstelle des Bauteils wird von einer ein- oder mehrwindig wassergekühlten Induktionsspule umschlossen. Die Induktionsspule muss der Form des Werkstücks angepasst sein. Aus diesem Grund ist das Verfahren besonders für rotationssymmetrische Teile geeignet. Die Spule wird von einem Wechselstrom durchflossen. Dadurch baut sich im Fügeteil ein wechselndes Magnetfeld auf, welches elektrischen Strom erzeugt und das Werkstück erwärmt [6]. Zu den Prozessanlagen gehört ein Mittelfrequenzgenerator oder Hochfrequenzgenerator.

	Mittelfrequenz	Hochfrequenz
Frequenz	1000 – 10.000 Hz	0,1 – 5 MHz
Abmessung der Cu-Teile [Dicke t]	t = 4 – 12 mm	t = 0,3 – 3 mm
Sendeleistung	20 – 300 kW	2 – 30 kW
Lötzeit	0,5 – 4 min	5 – 60 sec
Einsatzgebiet	Gerätebau, Fahrzeugbau	Feinwerktechnik, Elektrotechnik, Werkzeugbau, Luft- und Raumfahrttechnik
Kopplungsspalt zwischen Induktor und Lötteil	2 – 4 mm	für Cu: 1 – 2 mm
Spaltbreite	0,05 – 0,25 mm (für kleine Spalte unter Schutzgas!; sonst Flussmittel) Frequenz	

Tabelle 28 - Merkmale zum Induktionslöten (Mittel- und Hochfrequenz) [6]

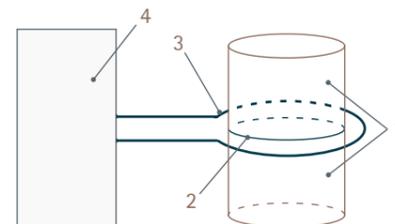
Tabelle 29 zeigt ein Beispiel zu den Eindring-/ bzw. Wirkiefen bei Kupfer und Messing mit verschiedenen Frequenzen. Deutlich zu erkennen ist, dass sich kleine Frequenzen für tiefe Schichten am Bauteil eignen und hohe Frequenzen für die Bearbeitung an der Oberfläche.

Werkstoff	Temperatur [°C]	Wirktiefe [mm] für folgende Frequenzen:			
		50 Hz	500 Hz	10 kHz	1 MHz
Kupfer	600	17	5,5	1,2	0,12
Messing	600	26	8,5	1,8	0,18

Tabelle 29 - Bsp. Wirkiefen bei diversen Frequenzen [32]

Das Induktionslöten bietet einige Vorteile gegenüber anderen Lötverfahren: es besteht keine Arbeitsplatzbelastung durch Licht, Wärme und Lärm, die Anlagen lassen sich gut mechanisieren oder automatisieren, der Energieverbrauch ist niedrig und die Aufheizzeiten kurz, was vorteilhaft für temperaturempfindliche

Teile ist. Nachteilig sind neben dem elektromagnetischen Feld, welches beim Lötvorgang entsteht, die Anschaffungskosten einer Induktionsanlage, weshalb sie besonders für die Herstellung großer Stückzahlen geeignet ist [6].



1. Bauteile 2. Verbindung 3. Induktor 4. Generator

Abbildung 24 - Induktionshartlöten [10] (oben)
Tabelle 30 - Vor-/Nachteile vom Induktionslöten (unten)

Vorteile

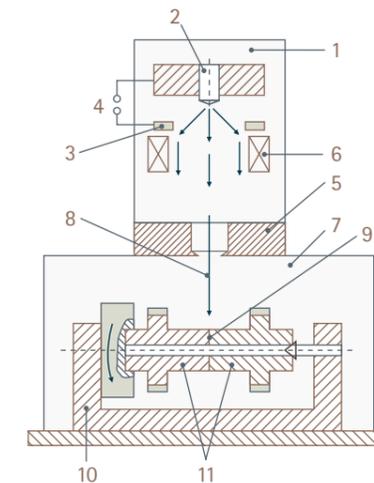
- berührungsloses Verfahren
- kurze Lötzeiten
- hohe Qualität der Lötstelle
- gleichmäßige Erwärmung der Bauteile

Nachteile

- Investitionskosten
- Zugänglichkeit muss gewährleistet sein
- vorzugsweise für rotationssymmetrische Bauteile
- elektromagnetisches Feld

4.5.7. Elektronenstrahlhärten

Das Elektronenstrahlhärten ist ein Hartlötprozess und wird im Fein- oder Hochvakuum durchgeführt. Der Prozess ist durch hohe Leistungsdichten und kleine Strahldurchmesser gekennzeichnet. Durch thermische Emission werden von der Kathode die Elektronen emittiert, welche durch die zwischen Anode und Kathode angelegte Beschleunigungsspannung (15 – 175 kV) im elektrostatischen Feld beschleunigt werden. Der Elektronenstrahl tritt durch eine Anodenbohrung aus dem Strahlerzeugungssystem. Durch Absorption eines gebündelten Elektronenstrahls wird die Lötstelle erwärmt. Kinetische Energie wird in Wärmeenergie umgewandelt. Der Einsatz von Lotformteilen sowie lotbeschichteten Teilen ist bei diesem Prozess zwingend erforderlich. Das Elektronenstrahlhärten findet z. B. Anwendung bei Bauteilen, welche geometrisch eng tolerierte Lötstellen aufweisen, örtliche Energieeinbringung mit hohen Leistungsdichten gefordert ist und wo hohe Aufwärmgeschwindigkeiten in kurzer Zeit realisiert werden müssen [6].



1. Vakuummkammer 2. Kathode 3. Anode 4. Anschlüsse für Stromversorgung 5. Strahlablenkungssystem 6. Fokussierungslinse 7. Hartlötchamber 8. Elektronenstrahl 9. Verbindung 10. Verbindung zur Werkstückbewegung 11. Bauteile

Abbildung 25 - Elektronenstrahlhärten [10]

Vorteile

- geringer Wärmeeintrag im Grundwerkstoff
- gut reproduzierbar
- geringer Bauteilverzug
- geringer Aufwand für Vor- und Nachbehandlungsmaßnahmen

Nachteile

- Anwendung bevorzugt im Vakuum möglich
- Röntgenstrahlung
- Einsatz von Lotformteilen bzw. Lotbeschichteten Teilen notwendig

Tabelle 31 - Vor-/Nachteile Elektronenstrahlhärten

Lotwerkstoff	DIN ISO 24373 (2009)		DIN EN ISO 17672 (2013)
	Bezeichnung	Werkstoffnummer	Werkstoffnummer
Silizium-Bronze	CuSi2Mn1	Cu 6511	Cu 521
Silizium-Bronze	CuSi3Mn1	Cu 6560	Cu 541
Zinn-Bronze	CuSn6P	Cu 5180A	Cu 922
Zinn-Bronze	CuSn12P	Cu 5410	Cu 925
Aluminium-Bronze	CuAl7	Cu 6100	Cu 561
Aluminium-Bronze	CuAl10Fe	Cu 6180	Cu 565
Mangan-Bronze	CuMn13Al8Fe3Ni2	Cu 6338	Cu 571

Tabelle 32 - Übersicht wichtiger Lot- bzw. Zusatzwerkstoffe zum Laser- und Lichtbogenlöten

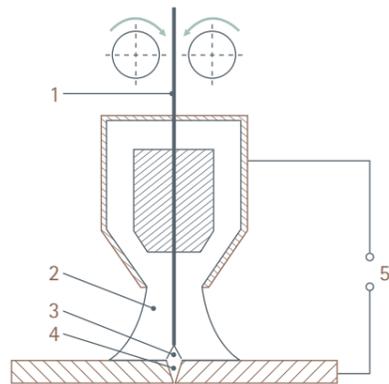


In den letzten Jahren hat das MIG-Löten mit abschmelzenden Drahtelektroden und auch das Plasmalöten besonders beim Fügen von verzinkten Feinstahlblechen (Blechdicke unter 3 mm) im Karosseriebau der Automobilindustrie an Bedeutung gewonnen. In Abbildung 26 ist die rundumlaufende MIG-Lötnaht eines Motorradkraftstofftanks zu sehen [33].

Abbildung 26 - Kraftstofftank einer Honda VT 1300CX mit CuAl8-Lot [33]

5. Qualitätssicherung

Untersuchungen haben ergeben, dass bei Lichtbogenprozessen unter Schutzgas die häufig eingesetzten Kupferbasislote Diffusions- und Anlösungsmöglichkeiten zwischen den Grund-, Beschichtungs- und Lotwerkstoffen bewirken. Die Grenzfläche zum Lot sollte weitgehend metallisch blank und frei von Verunreinigungen sein, damit es zu einer metallurgischen Wechselwirkung zwischen Grundwerkstoff und dem benetzenden Lot kommt. Ein Flussmittel ist nicht erforderlich, weil die Aktivierung der Oberfläche durch den Lichtbogen erfolgt. Dem Merkblatt DVS 0938-1 (2012) können weitere Informationen über Grundlagen, Verfahren und Anforderungen an die Anlagentechnik entnommen werden. Anwendungshinweise zum Lichtbogenlöten sind im Merkblatt DVS 0938-2 (2005) aufgeführt. Das Lichtbogenlöten konkurriert gegenüber dem Laserlöten mit einer preisgünstigeren Anlagentechnik [6] [34] [35].



1. drahtförmiges Lot 2. Schutzgas 3. Lichtbogen
4. Lötstelle 5. Stromquelle

Abbildung 27 - Lichtbogenlöten (MIG) nach [6]

Vorteile

- hohe Produktivität
- kaum Aufwand für Vor- und Nachbehandlung (Flussmittel entfällt)
- geringer Bauteilverzug
- gut mechanisierbar
- hohe Lötgeschwindigkeit
- geringe Investitionskosten
- optisch sehr gute Oberflächen

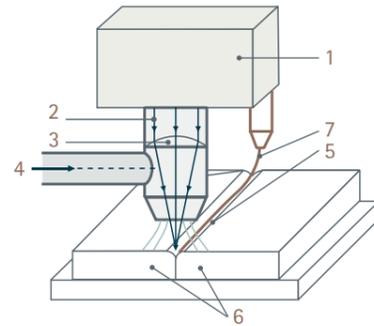
Nachteile

- exakter Drahtvorschub erforderlich
- Blaswirkung des Lichtbogens beachten

Tabelle 33 - Vor-/Nachteile Lichtbogenlöten

4.5.9. Laserstrahlhärten

Mit dem Laserstrahlhärten können Weich- und Hartlötprozesse durchgeführt werden. Bei Anwendungen im Automobilbau kommt meist das Laserstrahlhärten zum Einsatz. Es können mit diesem Verfahren hohe Temperaturen erzielt werden, so dass sich z. B. Kupferbasislote mit hohen Schmelzbereichen sehr gut verarbeiten lassen. Ein sehr genau fokussierter Strahl erbringt hohe Leistungsdichten bei geringer Wärmeeinbringfläche. Als Strahlquelle für Kupferbasislote eignet sich besonders ein Nd-YAG-Festkörper-Laser mit einer Wellenlänge von 1,06 µm, dessen Strahlung vom Lot effektiv absorbiert wird. Es sollte darauf geachtet werden, mit lotbeschichteten Teilen oder exakt fixiertem eingelegtem Lot zu arbeiten. Die Technologie des Laserstrahlhärens wird z. B. in der Elektro-, Automobilindustrie und Feinwerktechnik angewendet. Es können sehr kurze Lötzeiten erreicht werden, beispielsweise sind bei SMD-Bauteilen Zeiten im Millisekundenbereich pro Verbindung möglich [6].



1. Stromquelle/Netzgerät 2. Laserstrahl 3. Fokussierlinse
4. Schutzgas 5. Lötstelle 6. Bauteile 7. Lotdraht

Abbildung 28 - Laserstrahlhärten nach [6]

Im Automobilbereich werden häufig verzinkte Karosserieteile laserstrahlhärten. Der Vorteil besteht darin, hohe Fügegeschwindigkeiten zu realisieren, um den Bauteilverzug durch geringe Wärmeeinbringung zu minimieren [36]. Die Bilder in Tabelle 34 zeigen eine lasergelötete Dachnaht mit einem CuSi3Mn1-Lot. Es können beim Laserhärten die gleichen Lotwerkstoffe wie beim Lichtbogenlöten (siehe Tabelle 32) eingesetzt werden [37].



Lasergelötete Dachnaht eines Volkswagen Passat CC (2008)
Lasergelötete Dachnaht eines Audi Q5 (2008)

Tabelle 34 - Beispiele einer Laserhärtennaht [33] (oben)
Tabelle 35 - Vor-/Nachteile Laserstrahlhärens (unten)

Vorteile

- sehr hohe Produktivität
- geringer Aufwand für Vor- und Nachbehandlung (Flussmittel entfällt)
- gut mechanisierbar
- geringer Bauteilverzug
- hohe Lötgeschwindigkeit

Nachteile

- hohe Investitionskosten
- exakte Drahtführung und exakter Drahtvorschub erforderlich

Die Qualitätssicherung ist eine Säule des Qualitätsmanagements und befasst sich mit der Nachweisführung. Sie dient zur Vermeidung von Produktfehlern und Lieferschwierigkeiten. Ähnlich wie beim Schweißen hängt die Qualität auch von der Qualifikation und der Erfahrung des auszuführenden Personals ab. Löten ist ein physikalisch-chemischer Prozess, bei welchem durch die Wechselwirkung zwischen dem festen Grundwerkstoff und dem geschmolzenen Lot eine stoffschlüssige Verbindung entsteht. Naturgesetze wie Kapillarität oder Benetzungsvorgänge werden beim Löten genutzt. Bei der richtigen Anpassung von Grundwerkstoff und Lot sowie einer optimalen Gestaltung der Lötverbindung, lassen sich sogar teilweise zuverlässigere Verbindungen als beim Schweißen herstellen [38]. Dieses Kapitel soll eine Übersicht zur Qualitätssicherung geben, erhebt jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Beim Löten können z. B. folgende Mängel auftreten:

- Verbrennung des Flussmittels aufgrund zu hoher Temperaturen,
- schlechte Benetzung durch das Lot,
- falsche Lot- oder Flussmittelauswahl,
- Fügeflächen falsch oder nicht vorbehandelt,
- Entnetzung durch Oxidation der Lötstelle wegen zu langer Lötzeit.

Aus diesem Grund ist es wichtig, eine Qualitätsdokumentation anzulegen. Die Dokumentation soll vor möglichen Schäden bewahren und im Zweifelsfall beweisen, dass der Fehler im betrieblichen Ablauf nicht hätte eintreten können. Die Normen für Qualitätsmanagementsysteme, DIN EN ISO 9001 (2008) und ISO/TS 16949 (2009), sind dabei wichtige Empfehlungen. Des Weiteren sind im DIN-DVS-Taschenbuch 196 Teil 1 und 2 alle wesentlichen Normen und DVS Merkblätter zum Weich- und Hartlöten enthalten. Zusätzlich zu den Normen existieren

Merkblätter und Richtlinien des Deutschen Verbandes für Schweißen und verwandte Verfahren (DVS). Beim Löten existieren weniger technische Regeln und anerkannte Methoden der Qualitätssicherung als beim Schweißen. Vorrangige Kriterien sind neben der Qualifizierung des Personals die Überwachung in der Fertigung, die Kontrolle der Verbindungen sowie die Bewertung der Lötverbindungen.

Es ist eine reproduzierbare, qualitativ hochwertige Lötverbindung herzustellen, wobei die Wirtschaftlichkeit nicht außer Acht gelassen werden darf. Neben der Ausführung des Lötvorganges werden bezüglich der Vor- und Nachbehandlungsverfahren, Fixierung der Lötteile etc. hohe Anforderungen an die Qualifizierung des Personals gestellt. Folgende Richtlinien und Normen für die Durchführung von Lehtgängen existieren: DVS-Richtlinie 1183 (2004), DIN ISO 11745 (2011) und DIN EN ISO 13585 (2012).

Des Weiteren muss für eine wirtschaftliche und qualitätsgerechte Fertigung der Lötprozess überwacht werden, um Unregelmäßigkeiten im Ablauf rechtzeitig zu erkennen und ggf. ausgleichen zu können. Dies erfolgt durch die Erfassung von Prozessparametern (z. B. Temperatur-Zeit-Verläufe) und der Überwachung von Zusatzwerkstoffen und Hilfsstoffen. Manuelle Prozesse, wie z. B. das Kolbenlöten, setzen eine umfangreiche Ausbildung des Lötpersonals und handwerkliches Können voraus, da meist auf Messgeräte der Bauteiltemperaturen verzichtet wird. Bei mechanisierten und automatisierten Verfahren kann auf eine Erfassung der Prozessparameter durch messtechnische Hilfsmittel nicht verzichtet werden, wie z. B. beim Löten in einem vollständig eingehausten Durchlaufofen.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Beurteilung der Lötverbindung in Bezug auf die geometrische und metallurgische Ausbildung der Lötnaht. Die Maß- und Sichtprüfung ist obligatorisch. Für den Nachweis von Rissen und Poren sind das Farbeindring- und das Magnetpulververfahren geeignet. Sollen innere Lötfehler und der Füllgrad beurteilt werden, kommt die Durchstrahlungs- oder Ultraschallprüfung zum Einsatz. Dabei sind z. B. unterschiedliche Werkstoffe und verschiedene Bauteildicken zu beachten. Metallographische Schlifffproben werden angefertigt bei der Kontrolle des Gefügestandes, der Übergangszone, der Lötnahtbreite und der Erosion. Im Behälter- und Rohrleitungsbau bedarf es einer Druck- und Dichtigkeitsprüfung [6]. Die Eigenschaften der Lötverbindung können zerstörend für Weichlötverbindungen nach DIN 8526 (1977) und für Hartlötverbindungen nach DIN EN 12797 (2000) geprüft werden. Die zerstörungsfreie Prüfung kann auf Basis der DIN EN 12799 (2000) erfolgen.

Des Weiteren können an Lötverbindungen Unregelmäßigkeiten wie z. B. Risse, Bindefehler, Hohlräume, etc. auftreten. Eine Zusammenstellung dieser Unregelmäßigkeiten ist in DIN EN ISO 18279 (2004) in einem umfangreichen Klassifikationssystem aufgeführt. DIN 65170 (2009) erläutert die zulässigen Unregelmäßigkeiten. Außerdem sind in dieser Norm Füllgrade festgelegt, die ein wichtiges Kriterium zur Bewertung von Lötverbindungen bilden. [6]

6. Fallbeispiele

Qualitätsanforderungen Löttechnik

Betrieb	Personal	Fertigung	Prüfung/ Bewertung
Qualitätsmanagementsystem DIN EN ISO 9001 (2008) ISO/TS 16949 (2009)	Prüfung der Lötter DIN ISO 11745 (2011) DIN EN 13585 (2012) DVS-Richtlinie 1183 (2004)	Lötverfahren DIN ISO 857-2 (2007)	Zerstörungsfrei DIN EN 12799 (2000) Zerstörend DIN 8526 (1977) DIN EN 12797 (2000) Unregelmäßigkeit DIN EN ISO 18279 (2004) DIN 65170 (2009)

Tabelle 36 - Übersicht einiger Qualitätsanforderungen

6.1. Heißverzinnung von Leiterplatten

Die Heißverzinnung, auch als Hot-Air-Levelling (HAL) bekannt, wird zum Beschichten von Leiterplatten verwendet. Ein vorheriges Entfernen von Schmutz oder Anlaufschichten auf der Leiterplatte ist bei dieser Technologie unbedingt notwendig, um eine benetzbare Kupferschicht zu erhalten. Nach dem Vorreinigen erfolgt an der Fluxstation der Flussmittelauftrag. Dieser sollte so gering wie möglich sein, um die Anlage wenig zu verschmutzen. Mit halb- oder vollautomatischen Anlagen erfolgt das Heißverzinne vertikal oder horizontal (siehe Tabelle 37). Das horizontale HAL-Verfahren unterteilt sich in Wellen- und Walzenverzinnung. [39]

Beim bleihaltigen Heißverzinne ist die Lotauswahl von Bedeutung, denn Kupfergehalte von mehr als 0,3 % im Lot führen zu unebenen Oberflächen. Für die Gewährleistung gleichbleibender Verzinnungsergebnisse sollten in bestimmten Zeitabständen Lotanalysen erfolgen. Diese werden von Lotlieferanten meistens kostenlos durchgeführt. [39]

HAL-Verfahren

	Wellenverzinnung	Walzenverzinnung
vertikal	<ul style="list-style-type: none"> · Eintauchen gefluxter Leiterplatte in heißes Lotbad · Herausziehen nach kurzer Verweilzeit · Abblasen von überschüssigem Lot durch heiße Druckluft (Luftmesser) · Ergebnis: freie Bohrungen und ungleichmäßige Lotschichtdicke auf der Platine, deshalb horizontale Trocknung vorteilhaft 	
horizontal	<ul style="list-style-type: none"> · Kontinuierliche Geschwindigkeit der Verzinnung über die gesamte Anlagenlänge · Transport der Leiterplatte durch die Lotwelle · Abblasen über Luftmesser · Kontaktzeit mit dem Lot ist länger als beim Walzenverzinne 	<ul style="list-style-type: none"> · Beschleunigung der Leiterplatte nach dem Fluxen · Führung der Leiterplatte durch bis zu 3 Walzenpaare · anschließend Ausblasen

Tabelle 37 - Verfahrensablauf vertikaler und horizontaler HAL-Anlagen

6.2. Bandverzinnung

Verzinnete Bänder aus Kupfer und Kupferlegierungen sind das Rohmaterial für Steckkontakte und finden vielfältige Anwendungen, z. B. als Steckkontakte an Kabelbäumen in Fahrzeugen, in Computern und elektronischen Geräten. Die Miniaturisierung dieser Bauteile stellt hohe Anforderungen an die Qualität der Verzinnung. Um diese Qualitätsanforderungen zu erfüllen, werden die Bänder in Zinnbädern feuerverzinkt mit nicht-korrodierenden, rückstandsfreien Flussmitteln (siehe Tabelle 15), die für jede einzelne Bandverzinnungsanlage und auch für Legierungen optimiert werden müssen. Korrodierende Flussmittel kommen nur selten zum Einsatz, weil häufig von den Anwendern verzinnter Bänder eine chloridfreie Verzinnung gefordert wird. Die Schichtdicken beim Verzinnen können individuell nach Abnehmervorgabe eingestellt werden [24].

6.3. Herstellung von Wärmetauschern aus Kupfer

Wärmetauscher aus Kupfer/Messing werden wegen ihrer guten Wärmeleitfähigkeit und ihrer hohen mechanischen Stabilität z. B. in Klimaanlage von Nutzfahrzeugen, als Kühler in Baumaschinen oder als Industriekühler verwendet. Sie werden in vier Schritten hergestellt. Zu Beginn erfolgt die maschinelle Verzinnung von Messingband durch Feuerverzinnung im Zinnbad und das Ziehen von Röhren. Nach diesem Vorgang werden die Röhren mit Kupferlamellen im Ofen verlötet. Mit dem Tauchlötverfahren wird der Endboden mit den Röhren verbunden. Anschließend wird der Wasserkasten durch Handlöten an die Endböden gefügt. Bei allen Schritten werden bevorzugt nicht-korrodierende oder rückstandsfreie Flussmittel verwendet. Für optimale Lötresultate werden die Flussmittel entsprechend der jeweiligen

Anwendung ausgewählt. Korrodierende Flussmittel sind nur in Ausnahmefällen zu verwenden, da durch zusätzliche Spülvorgänge Folgekosten verursacht werden [24].

Für das Ausgleichsrohr eines Wärmetauschers kann ein flexibles Kupfer-Innenrohr ohne Flussmittel durch Lichtbogenlöten (WIG-Verfahren) mit einem schützenden Bronzegeflecht verbunden werden. Als Lotzusatz dienen hier hochzinnhaltige Bronzestäbe, z. B. CuSn12P. Beim WIG-Verfahren wird ein Lichtbogen über eine Wolframnadel gezündet und das Lot als Stab mit der Hand zugeführt. Gut ausgeführte Lötungen haben eine optisch ansprechende Erscheinung [33].



Abbildung 29 - Wärmetauscherrohr [33]

6.4. Herstellung von Hochleistungs-Kompakt-Wärmetauschern aus Kupfer

Für die Herstellung von Hochleistungs-Kompakt-Wärmetauschern aus Kupfer und Buntmetallen wird das CuproBraze®-Verfahren angewendet. Durch die hohe Leistungsdichte und kompakte Bauweise dieser Wärmeübertrager erfolgt ihr Einsatz besonders im Automobil- und Flugzeugbau, aber auch in der Kälte- und Elektrotechnik für Kühler, Kondensatoren und Verdampfer. Ein Vorteil bei der Benutzung von Kühlern aus Kupferwerkstoffen gegenüber Aluminiumkühlern ist die Vermeidung von Geruchbildung durch Bakterien und Pilzen in den Kühlkanälen. Beim

CuproBraze®-Verfahren handelt es sich um einen Hartlötprozess, bei welchem das Lot CuNiSnP eingesetzt wird. Nach Herstellung der Rohre und Lamellen für den Wärmetauscher werden diese mit einer Lotpaste versehen. Die beloteten Elemente werden zu einem Kühlkörper mit Halterung zusammengesetzt, auf den anschließend noch einmal Lotpaste appliziert wird, bevor sie in einem Durchlaufofen gelötet werden. Flussmittel sowie eine anschließende Spülbehandlung entfallen [40] [41].



Abbildung 30 - Hochleistungs-Kompakt-Wärmetauscher [12]

7. Begriffe

Abkühlzeit

„Zeit, in der die Verbindung von der Löttemperatur auf Umgebungstemperatur abgekühlt wird“ [10]

Aufwärmzeit

„Zeit, in der die Löttemperatur erreicht wird. Sie umfasst außerdem die Durchwärmzeit und kann auch andere Zeiten enthalten, z. B. Entgasung“ [10]

Benetzen

„Ausbreiten und Haften einer durchgehenden dünnen Schicht aus geschmolzenem Lot auf der Oberfläche des zu fügenden Bauteils“ [10]

Diffusionsphase/ Übergangsphase

„Schicht von Phasen, die während des Lötens gebildet wird und deren chemische Zusammensetzung sich von Grundwerkstoff und Lötgut unterscheidet“ [10]

Durchwärmtemperatur

„Temperatur, bei der die zu lötenen Bauteile gehalten werden, so dass sie einheitlich durchgewärmt werden“ [10]

Durchwärmzeit

„Zeit, in der die zu lötenen Bauteile auf Durchwärm-/Vorwärmtemperatur gehalten werden“ [10]

Entnetzen

„Beseitigung von festem Lot, welches, obwohl es über die Oberfläche der zu fügenden Bauteile verteilt wurde, es nicht binden konnte, z. B. auf Grund von mangelhaftem Säubern oder mangelhafter Flussmittelzugabe“ [10]

gelötete Baugruppe

„die durch Löten aus zwei oder mehreren Bauteilen vereinigt wird“ [10]

Gesamtzeit

„Zeit, die die Aufwärmzeit, die Haltezeit und die Abkühlzeit umfasst“ [10]

Grundwerkstoff

„Werkstoff, der weich-/hartgelötet werden soll“ [10]

Haltezeit

„Zeit, in der die Verbindung auf Löttemperatur gehalten wird“ [10]

Kapillareffekt

„Kraft, ausgelöst durch Oberflächenspannung, die das geschmolzene Lot in den Spalt zwischen die zu fügenden Bauteile hineinzieht, auch entgegen der Schwerkraft“ [10]

Liquidustemperatur

Grenztemperatur, oberhalb der nur Schmelze vorliegt

Lötbarkeit

„Eigenschaft eines Bauteils, durch Löten derart hergestellt werden zu können, dass es die gestellten Anforderungen erfüllt“ [2]

Löteignung

„Werkstoffeigenschaft, die von der Fertigung und in geringerem Maß von der Konstruktion mitbestimmt wird“ [2]

Lötgut

„Metall, das durch den Lötprozess gebildet wird“ [10]

Löten

„Fügeprozess, bei dem ein geschmolzenes Lot genutzt wird, das eine Liquidustemperatur besitzt, die tiefer ist als die Solidustemperatur der/des Grundwerkstoffe(s). Das geschmolzene Lot benetzt die Oberflächen der/des Grundwerkstoffe(s) und wird während oder bei Ende des Aufheizens in einem engen, zwischen den zu fügenden Teilen existierenden Spalt hineingezogen (oder, falls vorab eingelegt, dort gehalten).“ [10]

Lötmöglichkeit

„Fertigungseigenschaft, die vorwiegend von der Konstruktion und weniger vom Werkstoff bestimmt wird“ [2]

Lötnaht

„Bereich des Fügeteils, der den zu fügenden Werkstoff und die Diffusions-/Übergangszone umfasst“ [10]

Lötsicherheit

„Konstruktionseigenschaft, die gleichermaßen vom Werkstoff und von der Fertigung bestimmt wird“ [2]

Lötstoß

„Verbindung, bei der der Spalt im Wesentlichen durch Kapillarkräfte mit Lot gefüllt wird, das heißt entweder ein stumpfer oder ein überlappender Spalt zwischen parallelen Stirnseiten der weich- oder hartzulötenden Bauteile“ [10]

Löttemperatur

„Temperatur an der Fügestelle, bei der das Lot die Oberfläche benetzt oder bei der eine flüssige Phase aufgrund von Grenzflächendiffusion gebildet wird und genügend Werkstofffluss eintritt“ [10]

Lötzeit

„Dauer des Lötzyklus“ [10]

Lot

„für Lötverbindungen notwendiger Zusatzwerkstoff, der als Draht, Einlage, Pulver, Pasten usw. vorliegen kann“ [10]

Lotpaste

Kombination aus Metallpulver mit/ohne Flussmittel, Einsatz von Weichlotpasten z. B. beim Reflowlöten; Einsatz von Hartlotpasten z. B. Rohrleitungen aus Kupfer und verzinktem Stahl

Solidustemperatur

Grenztemperatur, unterhalb der keine Schmelze vorliegt

verfahrensbeeinflusster Grundwerkstoff

„Werkstoff mit Eigenschaften, die sich vom Grundwerkstoff aufgrund der Beeinflussung durch den Lötprozess unterscheiden“ [10]

Wärmeeinflusszone

„Bereich der Grundwerkstoffe, der vom Lötprozess betroffen ist“ [10]

Wirktemperaturbereich

„Temperaturbereich, in dem die Flussmittel oder Schutzgasatmosphäre wirken“ [10]

8. Anhang

Die folgenden Tabellen zeigen eine Auswahl an Normen und Richtlinien für das Löten:

	Norm	Bezeichnung / (Erscheinungsjahr)
Allgemein	DIN 8514	Lötbarkeit (DIN 8514:2006-05)
	DIN ISO 857-2	Schweißen und verwandte Prozesse – Begriffe – Teil 2: Weichlöten, Hartlöten und verwandte Begriffe (ISO 857-2:2005)
Konstruktion	DIN 1912-4	Zeichnerische Darstellung; Schweißen, Löten; Begriffe und Benennungen für Lötstöße und Lötnahte (DIN 1912:1981)
	DIN EN ISO 2553	Schweißen und verwandte Prozesse, symbolische Darstellung in Zeichnungen, 2013
	DIN 65169	Luft- und Raumfahrt, Hart- und hochtemperaturgelötete Bauteile, Konstruktionsrichtlinien (DIN 65169:1986)
Verfahren / Fertigung	DIN EN 14324	Hartlöten – Anleitung zur Anwendung hartgelöteter Verbindungen; (Deutsche Fassung EN 14324:2004)
	DIN CEN/TS 13388	Kupfer und Kupferlegierungen – Übersicht über Zusammensetzungen und Produkte (DIN CEN/TS 13388:2013)
Werkstoffe / Zusatzwerkstoffe / Flussmittel	DIN EN ISO 3677	Zusätze zum Weich-, Hart- und Fugenlöten – Bezeichnung (ISO 3677:1992; Deutsche Fassung EN ISO 3677:1995)
	DIN EN ISO 17672	Hartlöten – Lote (ISO 17672:2010; Deutsche Fassung EN ISO 17672:2010)
	DIN 1707-100	Weichlote – Chemische Zusammensetzung und Lieferformen (DIN 1707-100:2011-09)
	DIN EN ISO 9453	Weichlote – Chemische Zusammensetzung und Lieferformen (ISO 9453:2014; Deutsche Fassung EN ISO 9453:2014)
	DIN EN 1045	Hartlöten – Flussmittel zum Hartlöten – Einteilung und technische Lieferbedingungen; (Deutsche Fassung EN 1045:1997)
	DIN EN 29454-1	Flussmittel zum Weichlöten; Einteilung und Anforderungen; Teil 1: Einteilung, Kennzeichnung und Verpackung (ISO 9454-1:1990; Deutsche Fassung EN 29454-1:1993)
	DIN EN ISO 9454-2	Flussmittel zum Weichlöten – Einteilung und Anforderungen – Teil 2: Eignungsanforderungen (ISO 9454-2:1998; Deutsche Fassung EN ISO 9454-2:2000)
	DIN EN ISO 13585	Hartlöten – Prüfung von Hartlötlern und Bedienern von Hartlöteinrichtungen (ISO 13585:2012; Deutsche Fassung EN ISO 13585:2012)
	DIN EN 13134	Hartlöten, Hartlötverfahrensprüfung (Deutsche Fassung EN 13134:2000)
	DIN ISO 11745	Löten im Luft- und Raumfahrzeugbau – Prüfung von Hartlötlern und Bedienern von Hartlötanlagen – Hartlöten von metallischen Bauteilen (ISO 11745:2010; DIN ISO 11745:2011-01)
Prüfung	DIN EN 12797	Hartlöten – Zerstörende Prüfung von Hartlötverbindungen (Deutsche Fassung EN 12797:2000)
	DIN 8526	Prüfung von Weichlötverbindungen (Spaltlötverbindungen, Scherversuch, Zeitstandsversuch.1977)
	DIN EN 12799	Hartlöten – Zerstörungsfreie Prüfung von Hartlötverbindungen; (Deutsche Fassung EN 12799:2000)
	DIN EN ISO 18279	Hartlöten – Unregelmäßigkeiten in hartgelöteten Verbindungen (ISO 18279:2003; Deutsche Fassung EN ISO 18279:2003) [2004]
	DIN 65170	Luft- und Raumfahrt – Hart- und hochtemperaturgelötete metallische Bauteile – Technische Lieferbedingungen; Text Deutsch und Englisch (2009)
	DIN 1900	Anforderung und Qualifizierung von Lötverfahren für metallische Werkstoffe – Verfahrensprüfung für das Lichtbogenlöten von Stählen (DIN 1900:2010-04)

Tabelle 38 – Auswahl an Normen zum Löten

Vorschriften / Richtlinien / Merkblätter

BGV D1	Berufsgenossenschaftliche Vorschrift für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit (04/2001)
Richtlinie DVS 1903-1	Löten in der Hausinstallation Kupfer Anforderungen an Betrieb und Personal (10/2002)
Richtlinie DVS 1903-2	Löten in der Hausinstallation Kupfer Rohre und Fittings – Lötverfahren Befund von Löt Nähten (10/2002)
Merkblatt DVS 0938-1	Lichtbogenlöten – Grundlagen, Verfahren, Anforderungen an die Anlagentechnik (08/2012)
Merkblatt DVS 0938-2	Lichtbogenlöten Anwendungshinweise (05/2005)
Merkblatt DVS 2602	Hartlöten mit der Flamme (04/2011)
Merkblatt DVS 2604	Öfen für das Hart- und Hochtemperaturlöten unter Vakuum (02/2008)
Merkblatt DVS 2606	Hinweise auf mögliche Oberflächenvorbereitungen für das flussmittelfreie Hart- und Hochtemperaturlöten (12/2000)
Merkblatt DVS 2607	Prozesskontrolle beim Hochtemperaturlöten (02/2008)
Merkblatt DVS 2608	Reparatur von Hochtemperaturlötverbindungen (02/2008)
Merkblatt DVS 2611	Visuelle Beurteilung von Weichlötstellen SMD auf Leiterplatte Kriterien im synoptischen Vergleich (05/1993)
Merkblatt DVS 2612-1	Flussmittel für das Weichlöten in der Elektronik – Hinweise für den Praktiker
Merkblatt DVS 2617	Neueinstufung und Etikettierungsvorschriften für Flussmittel zum Hartlöten, die Borsäure, Boraxpentahydrat oder di-Bortrioxid enthalten (09/2012)
DVGW GW 2 (A)	Verbinden von Kupfer- und innenverzinnenden Kupferrohren für Gas- und Trinkwasser-Installationen innerhalb von Grundstücken und Gebäuden (2012)
DVGW GW7	Flussmittel zum Löten von Kupferrohren für Gas- und Wasserinstallationen

Tabelle 39 - Vorschriften, Richtlinien und Merkblätter zum Löten

Temperatur nach DIN ISO 857-2 (2007)	Lötprozess	Lote	Lötverfahren	Anwenderbeispiele
≤ 450 °C	Weichlöten	Weichlote meist auf Zinnbasis; üblicherweise unter Verwendung von Flussmitteln; Verbindungsfestigkeit relativ gering	Kolbenlöten, Wellenlöten, Lotbadlöten	Kühler- u. Behälterbau, Elektronik, Herstellung von Leiterplatten, Verzinnung
> 450 °C	Hartlöten	meist Verwendung von Flussmitteln; geeignete Hartlote sind Silberhartlote, Messinghartlote, Kupferhartlote, flussmittelfrei an Luft sind Kupferwerk- stoffe unter phosphor- haltigen Loten lötbar; hohe Verbindungsfestigkeit	Flammlöten, Induktionslöten, Elektrisch Widerstands- löten, Ofenlöten	Kälte- und Klimatechnik, Gas- und Wasserinstallation, Klein- und Großapparatebau, Sanitäts- und Heizungsinstal- lation Kühlanlagenbau, Wärmetauscher, Fahrzeug- und Flugzeugbau, Energie- technik, Elektrotechnik / Elektronik

Tabelle 40 - Anwendungsbeispiele der Lotprozesse Weich- und Hartlöten

Grundwerkstoff	Lot							
	Bleilote	Zinn-Blei-Lote	Silberlote	Kupfer-Phosphor-Lote	Silber-Kupfer-Palladium-Lote	Kupfer-Zink-Lote	Kupfer-Nickel-Lote	Kupferlote
Aluminiumlegierungen		X		X				
Beryllium					X			
Gold					X			
Gusseisen				-		X	X	
Grauguss				-			X	
Temperguss				-		X	X	
Hartmetall						X	X	
Kupfer	X	X	X	X		X		
Kupferlegierungen	X	X	X	X		X		
Messing	X			X				
Molybdän					X			
Nickel		X	X		X	X	X	X
Nickellegierungen		X				X	X	X
Stahl unlegiert		X	X	-		X	X	X
Stahl legiert		X	X	-		X	X	X
Stahl hochfest			X	-			X	
Stahl korrosionsbeständig			X	-	X	(-)		
Stahl warmfest				-	X			
Titan					X			
Wolfram					X			
Zirkonium					X			

x gebräuchliche Kombination; - ungeeignete Kombination

Tabelle 41 - Matrix zur Auswahl gebräuchlicher Grundwerkstoff - Lot - Kombinationen

	Lot	Vorteil	Nachteil
Weichlote	Zinn-Blei-Lot	<ul style="list-style-type: none"> · gute technologische Eigenschaften · gute Plastizität 	<ul style="list-style-type: none"> · niedrige Kriechfestigkeit · allotrope Umwandlung von Zinn bei niedrigen Temperaturen (Gefahr der Zinnpest) · Versprödungsgefahr bei niedrigen Temperaturen · Korrosionsgefahr unter feuchten und tropischen Bedingungen
	Bleilote	<ul style="list-style-type: none"> · hohe Plastizität · gute technologische Verarbeitungseigenschaften · höhere Temperaturbeständigkeit als Zinn-Blei-Lote · hohe Kältebeständigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> · geringe Korrosionsbeständigkeit · toxische Bedenklichkeiten (gesundheits- und umweltschädlich)
	Bleifreie Lote	<ul style="list-style-type: none"> · recyclebar 	<ul style="list-style-type: none"> · längere Lötzeiten · langsamere Benetzung · höhere Arbeitstemperaturen · Gefahr von Whiskerbildung · Lötspitzenkorrosion beim Kolbenlöten
Hartlote	Silberlote	<ul style="list-style-type: none"> · gute Wärmeleitfähigkeit · gute elektrische Leitfähigkeit · hohe Plastizität · hohe Festigkeit · gute Korrosionsbeständigkeit · gute Benetzbarkeit · Oxide weisen eine geringe Beständigkeit auf · guter Ausgleich unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten 	<ul style="list-style-type: none"> · hohe Preise
	Kupfer-Phosphor-Lote	<ul style="list-style-type: none"> · sehr dünnflüssig · niedrige Löttemperatur · selbstfließendes Lot · gutes plastisches Verhalten 	<ul style="list-style-type: none"> · Gefahr der Bildung von Seigerungen · Gefahr der Bildung von Entmischungsporosität
	Silber-Kupfer-Palladium-Lote	<ul style="list-style-type: none"> · relativ niedrige Schmelztemperaturen, besonders von Vorteil bei Grundwerkstoffen, welche bei höheren Temperaturen zur Grobkornbildung neigen · gute Benetzungs- und Fließigenschaften 	<ul style="list-style-type: none"> · im Vergleich zu anderen Palladiumloten geringe Festigkeit bei hohen Temperaturen · hohe Preise
	Kupfer-Zink-Lote	<ul style="list-style-type: none"> · gutes plastisches Verhalten · hohe Festigkeit · hohe Temperaturbeständigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> · fallende Plastizität bei steigendem Zinkgehalt · bei steigender Löttemperatur verdampft Zink, was zu porösen Lötverbindungen führt · nicht für Schutzgas- und Vakuumlöten geeignet
	Kupfer-Nickel-Lote	<ul style="list-style-type: none"> · gute Hitzebeständigkeit · hohe Warmfestigkeit 	
	Kupferlote	<ul style="list-style-type: none"> · niedrigster Dampfdruck aller Lote · gute Viskosität · gutes Fließverhalten 	<ul style="list-style-type: none"> · bei sauerstoffhaltigem Kupfer und oxidierender Atmosphäre besteht die Gefahr der Bildung von Gaseinschlüssen und Erstarrungsrisen

Tabelle 42 - Übersicht einiger Vor- und Nachteile ausgewählter Lote

	Verordnung	Element	Bemerkung
seit 2006	RoHS DIR 2011/65/EU – Richtlinie (alte Richtlinie 2002/95/EG)	Blei	häufig in Weichlot enthalten
seit 2009	TRGS 528	Lötrauche	
seit 2006	TRGS 900	Arbeitsplatzgrenzwerte	
seit 2012	EG-Verordnung 1272/2008; 67/548/EWG (30./31. ATP); DVS Merkblatt 2617	· Borsäure · di-Bortrioxid · di-Natriumtetraborat, wasserfrei · di-Natriumtetraborat-Decahydrat · di-Natriumtetraborat-Pentahydrat	häufig in Flussmittel enthalten
seit 2011	EU Verordnung 494/2011	Cadmium	in Hartloten sind Cadmiumgehalte über 0,01 Gew.-% verboten

Tabelle 43 – Gefahrenstoffe

Umschlüsseltabellen

		DIN EN 29454-1	DIN 8511
Sn50Pb49Cu1 (162)	L-Sn50PbCu	1.1.1	F-SW31
Sn50Pb32Cd18 (151)	SnPb32Cd18	1.1.2	F-SW26
Sn96Ag4 (701)	L-SnAg5	1.1.3	F-SW27
Sn97Ag3 (702)	L-SnAg5	1.2.2	F-SW28
Sn95Sb5 (201)	L-Sn95	1.2.3	F-SW33
Sn97Cu3 (402)	L-SnCu3	2.1.1	F-SW24
Pb98Ag2 (181)	L-PbAg3	2.1.3	F-SW25
		2.1.2	F-SW25
		2.2	
		2.2.2	
		2.1.3	F-SW23
		2.2.1	
		2.2.3	
		2.2.3	F-SW34
		3.1.1	F-SW12
			F-SW21
		3.1.2	F-SW22
		3.2.1	F-SW13
		3.2.2	F-SW11

Tabelle 45 – Flussmittelbezeichnungen

Quellenverzeichnis

[1] D. e. R. Muhs, Maschinenelemente. Normung, Berechnung, Gestaltung, Wiesbaden: Vieweg+Teubner GWV Fachverlag, 2009.

[2] DIN 8514 – Lötbarkeit, 2006.

[3] K. Wittke und U. Füssel, Kombinierte Fügeverbindungen, Berlin: Springer-Verlag, 1996.

[4] H. J. Fahrenwaldt, Praxiswissen Schweißtechnik. Werkstoffe, Prozesse, Fertigung. 4. Auflage, Wiesbaden: Vieweg+Teubner GWV Fachverlag, 2011.

[5] H. J. Fahrenwaldt, Praxiswissen Schweißtechnik. Werkstoffe, Prozesse, Fertigung, Wiesbaden: Vieweg+Teubner GWV Fachverlag, 2009.

[6] K.-J. Matthes, Fügetechnik. Überblick, Löten, Kleben, Fügen durch Umformen, Leipzig: Carl-Hanser-Verlag, 2003.

[7] M. Türpe, Löttechnik. Vorlesung Löten, TU Dresden, 2008.

[8] DVS Fachgruppe 3.3, Fügetechnik Schweißtechnik, Düsseldorf: DVS Media GmbH, 2012.

[9] D. Schnee, Umicore AG & Co. KG, Businessline BrazTec, Grundlagen des Lötens, 2010.

[10] DIN ISO 857-2 – Schweißen und verwandte Prozesse – Teil 2: Weichlöten, Hartlöten und verwandte Begriffe, 2007.

[11] G. Schulze, Die Metallurgie des Schweißens, Berlin: Springer-Verlag, 2004.

[12] Umicore AG & Co. KG, Businessline BrazeTec, 2013.

[13] W. Schatt und H. Worch, Werkstoffwissenschaft, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003.

[14] ASM International, „Binary Alloy Phase Diagrams“.

[15] H. Bell, Reflowlöten, Bad Saulgau: Eugen G. Leuze Verlag, 2005.

[16] W. Müller und J.-U. Müller, Löttechnik. Leitfaden für die Praxis. Band 127., Düsseldorf: DVS-Verlag GmbH, 1995.

[17] Deutsches Kupferinstitut Berufsverband e. V., „Niedriglegierte Kupferwerkstoffe – Eigenschaften, Verarbeitung, Verwendung“, 2012.

[18] Wieland-Werke AG, Schlibbild Rohr-Fittings, 2012.

[19] VG 81245-3 – Nichteisen-Schwermetalle; Schweißzusätze und Hartlote; Auswahl, 1991.

[20] DVS Merkblatt 2607 – Prozesskontrolle beim Hochtemperlöten, 2007.

[21] DVS Merkblatt 2606 – Hinweise auf mögliche Oberflächen-vorbereitungen für das flußmittelfreie Hart- und Hochtemperlöten, 2000.

[22] H. Kleinert, Klebtechnik, Lehrmaterialien der Fakultät Maschinenwesen, Professur Fügetechnik und Montage, 2010

[23] DIN EN 29454-1 – Flussmittel zum Weichlöten, 1994.

[24] A. Ament; Lötmittel Techno Service GmbH & Co. KG, 2012.

[25] DIN EN 1045 – Flussmittel zum Hartlöten, 1997.

[26] DVS Merkblatt 2617 – Neueinstufung und Etikettierungsvorschriften für Flussmittel zum Hartlöten, die Borsäure, Boraxpentahydrat oder di-Bortrioxid enthalten, 2012.

[27] A. Rahn, Bleifrei löten. Lötprofile für bleifreie Lote, Legierungen, Parameter, Prozesse. Band 2., Bad Saulgau: Eugen G. Leuze Verlag, 2005.

[28] „Flammlöten mit der Acetylenflamme“, Linde AG, [Online]. Available: [http://www.linde-gas.de/international/web/lg/de/like35lgde.nsf/repositorybyalias/praktikertipps_flamml%F6ten/\\$file/flammlloeten.pdf](http://www.linde-gas.de/international/web/lg/de/like35lgde.nsf/repositorybyalias/praktikertipps_flamml%F6ten/$file/flammlloeten.pdf). [Zugriff am 20.09.2012].

[29] Merkblatt DVS 2602 – Hartlöten mit der Flamme, 2011.

[30] Günther-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH, Jena, 2012.

[31] H. Bell; Rehm Thermal Systems GmbH, „Reflowlöten“, Blaubeuren, 2012.

[32] „Lötverfahren“, Umicore AG & Co. KG, [Online]. Available: http://www.technicalmaterials.umicore.com/de/bt/brazingCenter/show_de_v_03_Loetverfahren.pdf. [Zugriff am 25.09.2012].

[33] Berkenhoff GmbH, 2013.

[34] Merkblatt DVS 0938-1 – Lichtbogenlöten – Grundlagen, Verfahren, Anforderungen an die Anlagentechnik, 2012.

[35] Merkblatt DVS 0938-2 – Lichtbogenlöten Anwendungshinweise, 2005.

[36] U. Berger und R. Mainhardt, „Welding Journal“, 2009.

[37] E. Schmid, „Proceedings 9. Int. Aachener Schweißtechnik Kolloquium „Fügen im Fahrzeugbau“,“ 2004.

[38] Petrunin, Handbuch Löttechnik, Moskau: Verlag Technik GmbH Berlin, 1984.

[39] VDE/VDI Schulungsblätter für die Leiterplattenfertigung, 1999.

[40] L. Tikana und A. Klassert, „Kupfer-Kühler für Leistungsstarke Motoren“, Metall, Bd. 62. Jahrgang, 10/2008.

[41] „www.cuprobrase.com“, 2013. [Online]. [Zugriff am 07.05.2013].

Bilder Deckblatt: www.iew.eu

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Definition der Lötbarkeit nach [2]	5
Abbildung 2	Lötverbindung Kupfer-Silber ohne Zusatzwerkstoff	6
Abbildung 3	Benetzung einer metallischen Oberfläche mit Lot [7]	7
Abbildung 4	Schema einer gelöteten Fügeverbindung nach [10]	8
Abbildung 5	Lotformteile [11]	10
Abbildung 6	Zustandsdiagramm Silber-Kupfer nach [14]	10
Abbildung 7	Flammlöten einer Kupferrohrverbindung [12]	13
Abbildung 8	Halbleiterträger [17]	19
Abbildung 9	Metallographischer Längsschliff einer Rohr-Fitting-Verbindung (Ag-CuP-Legierung) [18]	23
Abbildung 10	Unterschied Spalt- und Fugenlöten	26
Abbildung 11	Kapillarer Fülldruck in Abhängigkeit von der Spaltbreite [12]	27
Abbildung 12	Kapillarer Fülldruck in Abhängigkeit von der Spaltgeometrie [12]	27
Abbildung 13	Charakteristische Temperaturen und Zeiten beim Löten [20]	29
Abbildung 14	Schematischer Aufbau technischer Oberflächen [22]	32
Abbildung 15	Weichlötbeispiel Kolbenlöten (Leiterplatte) nach [10]	38
Abbildung 16	Lötbadweichlöten nach [10]	38
Abbildung 17	Wellenweichlöten nach [10]	39
Abbildung 18	Flammweichlöten nach [10]	40
Abbildung 19	Vakuumlöten [30]	41
Abbildung 20	Schematischer Aufbau eines Schutzgasdurchlaufofens nach [6]	41
Abbildung 21	Bestücktes Bauelement vor dem Umschmelzen der Pastendepots [31]	42
Abbildung 22	Schema einer Konvektions-Reflowlötanlage [31]	43
Abbildung 23	direktes Widerstandsweichlöten nach [10]	43
Abbildung 24	Induktionshartlöten [10]	44
Abbildung 25	Elektronenstrahlhartlöten [10]	45
Abbildung 26	Kraftstofftank einer Honda VT 1300CX mit CuAl8-Lot [33]	45
Abbildung 27	Lichtbogenlöten (MIG) nach [6]	46
Abbildung 28	Laserstrahlhartlöten nach [6]	46
Abbildung 29	Wärmetauschröhr [33]	49
Abbildung 30	Hochleistungs-Kompakt-Wärmetauscher [12]	49

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Zusammenhang zwischen Benetzungswinkel und Benetzung [7]	7	Tabelle 33	Vor-/Nachteile Lichtbogenlöten	46
Tabelle 2	Vergleich der physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Kupfer, wichtigen Kupferlegierungen und unlegiertem Stahl	9	Tabelle 34	Beispiele einer Laserhartlötnaht [33]	46
Tabelle 3	Weichlote nach DIN EN ISO 9453 (2014) und DIN 1707 Teil 100 (2011) für Kupfer und Kupferlegierungen	12	Tabelle 35	Vor-/Nachteile Laserstrahlötens	46
Tabelle 4	Auswahl an Hartloten für Kupfer und Kupferlegierungen auf Kupferbasis	14	Tabelle 36	Übersicht einiger Qualitätsanforderungen	48
Tabelle 5	Auswahl an Silberloten mit mehr als 20 % Silber für Kupfer und Kupferlegierungen	15	Tabelle 37	Verfahrensablauf vertikaler und horizontaler HAL-Anlagen	48
Tabelle 6	ausgewählte Kupfersorten	16	Tabelle 38	Auswahl an Normen zum Löten	51
Tabelle 7	Lote für das Weichlöten von Kupfer	17	Tabelle 39	Vorschriften, Richtlinien und Merkblätter zum Löten	52
Tabelle 8	Lote für das Hartlöten von Kupfer	18	Tabelle 40	Anwendungsbeispiele der Lotprozesse Weich- und Hartlöten	53
Tabelle 9	Unterschied Spaltlöten und Fugenlöten	26	Tabelle 41	Matrix zur Auswahl gebräuchlicher Grundwerkstoff - Lot - Kombinationen	54
Tabelle 10	Übersicht Montagespalt, Lötspalt und Lötnahtbreite	26	Tabelle 42	Übersicht einiger Vor- und Nachteile ausgewählter Lote	55
Tabelle 11	Geometrische Varianten von Lötverbindungen nach [6]	28	Tabelle 43	Gefahrenstoffe	56
Tabelle 12	Reinigungsverfahren für Kupferwerkstoffe [21]	30	Tabelle 44	Weichlote	56
Tabelle 13	Beizvorschläge für Kupfermaterialien für das flussmittelfreie Hartlöten [21]	31	Tabelle 45	Flussmittelbezeichnungen	56
Tabelle 14	Flussmittel zum Weichlöten nach DIN EN 29454-1 (1994) [23]	33			
Tabelle 15	Chemische Wirkung der Flussmittel zum Weichlöten [24]	33			
Tabelle 16	Flussmittel zum Hartlöten nach DIN EN 1045 (1997) [25]	34			
Tabelle 17	Gehalte für Gefahreinstufung [26]	35			
Tabelle 18	Schutzatmosphären zum Löten	35			
Tabelle 19	Möglichkeiten der Lotzuführung nach [10]	36			
Tabelle 20	Einteilung der Verfahren nach [10]	37			
Tabelle 21	Vor-/Nachteile vom Kolbenlöten	38			
Tabelle 22	Vor-/Nachteile des Lotbadtauchlöten	38			
Tabelle 23	Vor-/Nachteile Flammlöten	40			
Tabelle 24	Aktivierungsmöglichkeiten beim Ofenlöten	41			
Tabelle 25	Vor-/Nachteile vom Ofenlöten	41			
Tabelle 26	Vergleich verschiedener Prinzipien des Reflowlötens [31]	42			
Tabelle 27	Vor-/Nachteile vom Widerstandslöten	43			
Tabelle 28	Merkmale zum Induktionslöten (Mittel- und Hochfrequenz) [6]	44			
Tabelle 29	Bsp. Wirktiefen bei diversen Frequenzen [32]	44			
Tabelle 30	Vor-/Nachteile vom Induktionslöten	44			
Tabelle 31	Vor-/Nachteile Elektronenstrahllöten	45			
Tabelle 32	Übersicht wichtiger Lot- bzw. Zusatzwerkstoffe zum Laser- und Lichtbogenlöten	45			

Bearbeitung:

Theresa Kühne
Evelyn Hofmann
Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Füssel
Technische Universität Dresden

Mitwirkung:

Udo Adler
Jürgen Deutges
Udo Grimmer
Peter Herzog
Sabine Kalweit
Dr. Anton Klassert
Dr. Michael Köhler
Dr. Ahmad Parsi
Dr. Eberhard Schmid
Daniel Schnee
Kevin Wolf

**Deutsches Kupferinstitut
Berufsverband e. V.**

Am Bonneshof 5
40474 Düsseldorf
Deutschland

Telefon 0211 4796-300
Telefax 0211 4796-310

technik@kupferinstitut.de
www.kupferinstitut.de
www.copperalliance.de



**Deutsches
Kupferinstitut**
Copper Alliance