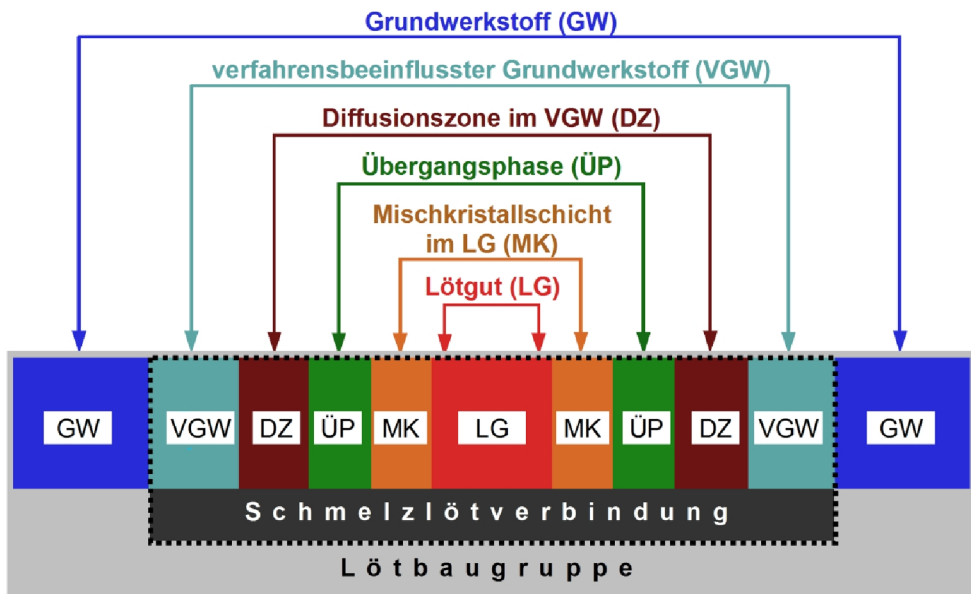


Konventionelle und alternative Lote zum Schmelzlöten von Metallen

Ex situ hergestellte Fertiglote nach der Norm
und in situ hergestellte Alternativlote vor der Norm

Klaus Wittke, Wolfgang Scheel, Mathias Nowotnick

STOFFSCHLUSS- VERBINDUNGSART	SCHWEISS- VERBINDUNG	LÖT- VERBINDUNG	KLEB- VERBINDUNG
chemische Bindung	gleich	gleich	ungleich
chemische Zusammensetzung	gleich	ungleich	ungleich



Wittke, Scheel, Nowotnick

Konventionelle und alternative Lote zum Schmelzlöten von Metallen

Ex situ hergestellte Fertiglote nach der Norm
und in situ hergestellte Alternativlote vor der Norm

Dieses Buch widmen wir unserem langjährigen Kollegen

Prof. Dr. Klaus Wittke,

***der bis zu seinem Tod mit großer Leidenschaft
an der Erarbeitung des Buches beteiligt war.***

Prof. Dr. Wolfgang Scheel

Prof. Dr. Mathias Nowotnick

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2016 Klaus Wittke, Wolfgang Scheel, Mathias Nowotnick

Herstellung und Verlag: BoD – [Books on Demand](#), Norderstedt

ISBN 9783741286698

INHALT

1.	Vorwort.....	7
2.	Besonderheiten des Schmelzlötens metallischer Werkstoffe mit temporär flüssigen Loten	10
3.	Fertiglote zum Schmelzlöten von Fe-Grundwerkstoffen.....	13
3.1.	Konventionelle Fertiglote zum Untersolidus-Schmelzlöten von Fe-Grundwerkstoffen	13
3.2.	Alternative Fertiglote zum Übersolidus-Schmelzlöten von Fe-Grundwerkstoffen	19
4.	Alternative Reaktivlote zum Untersolidus-Schmelzlöten	28
4.1.	Wesen und Besonderheiten der Reaktivlote und des Reaktivlot-Schmelzlötens.....	28
4.2.	Reaktivlöten von Fe-Legierungen, Cu-Legierungen und Al-Legierungen.....	30
4.3.	Reaktivlote – Beispiel für die Anwendung der Pikotechnologie.....	33
5.	Alternative Reaktionslote zum Untersolidus-Schmelzlöten	44
5.1.	Wesen und Besonderheiten der Reaktionslote und des Reaktionslot-Schmelzlötens.....	44
5.2.	Alternative Reaktionslote zum Untersolidus-Schmelzlöten von Fe-Grundwerkstoffen	51
5.3.	Alternative Cu-Reaktionslote.....	53
5.4.	Alternative Al-Reaktionslote	56
5.5.	Alternative Mg-Reaktionslote	59
5.6.	Alternative Ni- und Ti-Reaktionslote.....	62
6.	Alternative Kaskadenlote zum Untersolidus-Schmelzlöten	65
6.1.	Wesen und Besonderheiten der Kaskadenlote und des Kaskadenlot-Schmelzlötens.....	65
6.2.	Ausgewählte Beispiele für Kaskadenlote	68
7.	Alternative Übersoliduslote zum Schmelzlöten	76
7.1.	Wesen und Besonderheiten der Übersoliduslote beim Schmelzlöten	76
7.2.	Ausgewählte Beispiele für die Anwendung der Übersoliduslote beim Schmelzlöten.....	79
8.	Piko-dotierte Lote zum Schmelzlöten	84
8.1.	Wesen und Besonderheiten des Dotierens beim Schmelzlöten.....	84
8.2.	Dotieren der Lote	86
9.	Adaptive Schmelzlötverbindungen	93
9.1.	Wesen und Besonderheiten der adaptiven Schmelzlötverbindungen	93
9.2.	Fertigung adaptiver Schmelzlötverbindungen durch Überhitzen	105
9.3.	Fertigung adaptiver Schmelzlötverbindungen durch Überzeiten	108
9.4.	Fertigung adaptiver Schmelzlötverbindungen durch Übersättigen	110
10.	Exothermes Löten	113
10.1.	Grundlagen und Besonderheiten des exothermen Schmelzlötens.....	113

Konventionelle und alternative Lote zum Schmelzlöten von Metallen

10.2. Exotherm reagierende Lotwerkstoffe	120
10.3. Thermitgemische zum exothermen Schmelzlöten	128
11. Lote für flüssige Lötverbindungen	141
11.1. Wesen und Besonderheiten der flüssigen Lötverbindungen	141
11.2. Flüssige Lötverbindungen als neue Verbindungsvariante.....	143
12. Verbundlote und Verbundlötgut	150
12.1. Besonderheiten der Verbundlote	150
12.2. Anwendung der Verbundlote und des Verbundlötguts.....	153
13. Nachwort.....	164
14. Literatur.....	165

1. Vorwort

Die folgende [Abb. 1.1](#) zeigt das wahrscheinlich erste deutschsprachige Buch zum Löten, als einem der ältesten Verfahren der stoffschlüssigen Füge-technik.

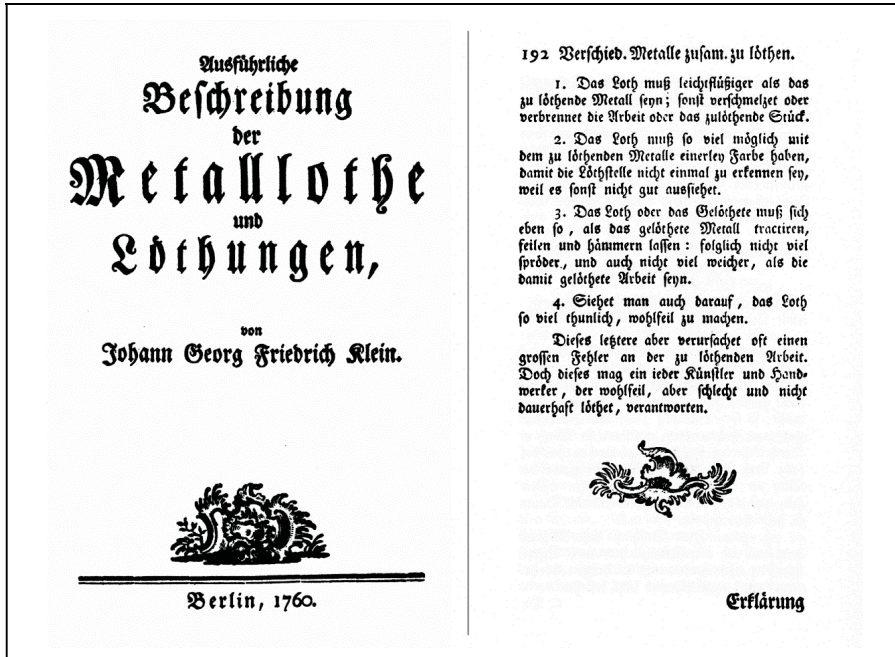


Abb. 1.1 Beschreibung der "Metallothie und Löhungen"
nach Johann Georg Friedrich Klein [Klei-60]

Das manuelle Flammlöten mit dem Blasrohr am Holzkohlenfeuer gehörte bereits Jahrtausende vor unserer Zeitrechnung zu den ersten Schmelzlötverfahren ([Abb. 1.2](#) links). In der Neuzeit gehört das manuelle Schmelzlöten mit elektrischen LötKolben unter anderem zu den Aufgaben der Astronauten an Bord der Internationalen Raumstation ISS ([Abb. 1.2](#) rechts).

Es hat also eine enorme Entwicklung der Löttechnik und speziell des Schmelzlötens mit temporär flüssigen Loten stattgefunden, was sich auch auf die Lote als Zusatzwerkstoffe ausgewirkt hat. Der folgende Beitrag berichtet deshalb über konventionelle und auch alternative Lote zum Schmelzlöten von Metallen. Die Autoren verweisen darauf, dass hier auf die Lote zum Press- und Kondensationslöten nicht eingegangen wird. Hier verweisen die Autoren auf ihr entsprechendes Handbuch [Witt-12].



Abb. 1.2 Antikes und modernes Schmelzlöten

Zum Schmelzlöten von metallischen Grundwerkstoffen mit den üblichen Konstruktions-, Funktions- und/oder Gebrauchseigenschaften werden in der Industrie heute im allgemeinen sogenannte vor dem Löten hergestellte Fertiglote für die einzelnen Schmelzlötverfahren auf dem Markt angeboten und in der Industrie verwendet. Der wesentliche Vorteil dieser Fertiglote besteht darin, dass ihre chemische Zusammensetzung vor dem eigentlichen Löten in verschiedenen Firmen der Zulieferindustrie ex situ hergestellt wird. Daher auch der in der Literatur heute immer öfter verwendete Begriff "Fertiglote". Die Lotzusammensetzung der Fertiglote (wie Fe-, Cu-, Ni-, Al-, Mg- und andere Fertiglote) ist in den entsprechenden Nachschlagewerken und auch technische Normen angegeben (Abb. 1.3).

Siehe dazu z. B. die Veröffentlichungen [Hump-93], [Lasc-77], [Lasc-88], [Lozm-75], [Müll-95], [Petr-03], [Ruza-78] und [Woda-73]. In diesen Quellen sind auch die technisch und wirtschaftlich wichtigen Schmelzlötverfahren beschrieben.

In den letzten Jahren erfolgte ergänzend zu diesem Stand der konventionellen bzw. kommerziellen Löttechnik eine bedeutsame Weiterentwicklung bzw. Neuentwicklung von alternativen Loten und alternativen Schmelzlötverfahren¹. In diesem Buch wird der Versuch unternommen, das Wesen und die technischen Besonderheiten dieser alternativen löttechnischen Werkstoffvarianten kritisch zu beschreiben.

¹ Beachte: Die Lötverbindung hat immer das Primat gegenüber dem Lötverfahren!

Konventionelle und alternative Lote zum Schmelzlöten von Metallen

Norm	Bezeichnung	Ausgabe
DIN 8513-3	Hartlote; Silberhaltige Lote mit mindestens 20 Gew.-% Silber, Zusammensetzung, Verwendung, Technische Lieferbedingungen	1979-10 (zurückgezogen)
DIN EN ISO 17672	Hartlöten - Lote	2010-11
DIN EN ISO 3677	Zusätze zum Weich-, Hart- und Fugenlöten – Bezeichnung	1995-04
DIN 1707-100	Weichlote - Chemische Zusammensetzung und Lieferformen	2011-09
DIN EN ISO 9453	Weichlote - Chemische Zusammensetzung und Lieferformen	2014-12
AWS A 5.8M/A 5.8	Specification for Filler Metals for Brazing and Braze Welding	2012
IPC J-STD-006C	Requirements for Electronic Grade Solder Alloys and Fluxed and Non-Fluxed Solid Solders for Electronic Soldering Applications (Appendix A)	11-2012

Abb. 1.3 Auswahl von Normen zu Fertiglöten

2. Besonderheiten des Schmelzlötens metallischer Werkstoffe mit temporär flüssigen Loten

Das Schmelzlöten von metallischen Grundwerkstoffen wird in der Industrie in großem Umfang für die Fertigung qualitätsgerechter Schmelzlötverbindungen angewendet. Die Schmelzlötverbindungen sind als Lötverbindungen eine von drei möglichen Arten von Stoffschlussverbindungen (Abb. 2.1).

STOFFSCHLUSS- VERBINDUNGSART	SCHWEISS- VERBINDUNG	LÖT- VERBINDUNG	KLEB- VERBINDUNG
chemische Bindung	gleich	gleich	ungleich
chemische Zusammensetzung	gleich	ungleich	ungleich

Abb. 2.1 Arten von Stoffschlussverbindungen

Die metallurgische Besonderheit der Lötverbindungen besteht demzufolge in der Gleichheit ihrer chemischen Bindung sowie der Verschiedenheit der chemischen Zusammensetzung einzelner Werkstoffbereiche². Ausgehend von den fertigungsspezifischen Aggregatzuständen der Werkstoffe in der Lötzone während des Lötprozesses wird zwischen den Presslötverbindungen bzw. Presslötverfahren (Fertigung z. B. durch das Ultraschall- oder Diffusionsschweißen von Werkstoffkombinationen bzw. unter Anwendung von Lotschichten), den Schmelzlötverbindungen bzw. Schmelzlötverfahren und den Kondensationslötverbindungen bzw. Kondensationslötverfahren (Fertigung z. B. durch galvanische Verfahren) unterschieden (Abb. 2.2).

PHYSIKALISCHE AGGREGATZUSTÄNDE				
fest		flüssig		dampfförmig
FERTIGUNGSSPEZIFISCHE AGGREGATZUSTÄNDE				
fest	viskos	flüssig		dampfförmig
LÖTVERFAHREN				
Kaltpress- löten	Warmpress- löten	Niedrigtemperatur- Schmelzlöten	Hochtemperatur- Schmelzlöten	Kondensations- löten
Press- löten	SCHMELZLÖTEN			Kondensations- löten

Abb. 2.2 Aggregatzustände der Werkstoffe in der Lötzone während des Lötens

Als Lote können für das Schmelzlöten von metallischen Grundwerkstoffen entweder reine Metalle, legierte Mischkristalle, eutektische Legierungen sowie auch intermetallische Werkstoffe verwendet werden (Abb. 2.3).

² Beachte: Schweißverbindungen sind ein Sonderfall der Lötverbindungen, wogegen Lötverbindungen ein Sonderfall der Klebverbindungen sind, Klebverbindungen stellen also den Regelfall dar.

ex-situ Fertigung der Lote beim Lothersteller vor dem Löten			in-situ Fertigung der Lote beim Lotanwender während des Lötens			
Fertiglote konventionelle	Fertiglote alternative	Übersolidus- Fertiglote	Reaktiv- lote	Reaktions- lote	Kaskaden- lote	pikodotierte Lote
Mischkristall-Lote						
Eutektik-Lote						
Metall-Lote						

Abb. 2.3 Mögliche Lotwerkstoffe für das Schmelzlöten von Metallen

Mittels Schmelzlöten können sowohl Lötverbindungen in Festkörpern³, Löt-auftragungen in Verbundkörpern als auch Löttränkungen in Verbundwerkstoffen gefertigt werden (Abb. 2.4).



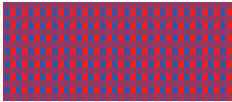


LÖTVERBINDUNG	LÖTAUFTRAGUNG	LÖTTRÄNKUNG
		
gelöteter Festkörper	Verbundkörper	Verbundwerkstoff
		

Abb. 2.4 Anwendungen des Schmelzlötens zum Fügen, Beschichten und Urformen

Man muss zwischen mittelbaren und unmittelbaren Lötverbindungen bzw. Schmelzlötverbindungen unterscheiden. Bei den unmittelbaren Schmelzlötverbindungen dienen auch immer begrenzte Anteile des Grundwerkstoffs als Zusatzwerkstoff.

Beim Schmelzlöten von Metallen wandelt sich der zu löten Grundwerkstoff in den verfahrensbeeinflussten Grundwerkstoff und das Lot als Zusatzwerkstoff in das Lötgut um. Beim Schmelzlöten können auch entsprechende Diffusionsschichten im verfahrensbeeinflussten Grundwerkstoff und eine Mischkristallschicht im Lötgut entstehen. In bestimmten Werkstoffsystemen ist auch die Bildung einer Übergangsphase zwischen dem Lötgut und dem verfahrensbeeinflussten Grundwerkstoff nicht grundsätzlich zu vermeiden. Eine Übersicht zu diesen möglichen Werkstoffbereichen in Schmelzlötverbindungen zeigt die folgende Abb. 2.5.

³ Flüssige Lötverbindungen in Festkörpern sind auch möglich, werden aber später betrachtet [Nowo-01], [Nowo-04.1], [Nowo-04.2], [Sche-04.1]

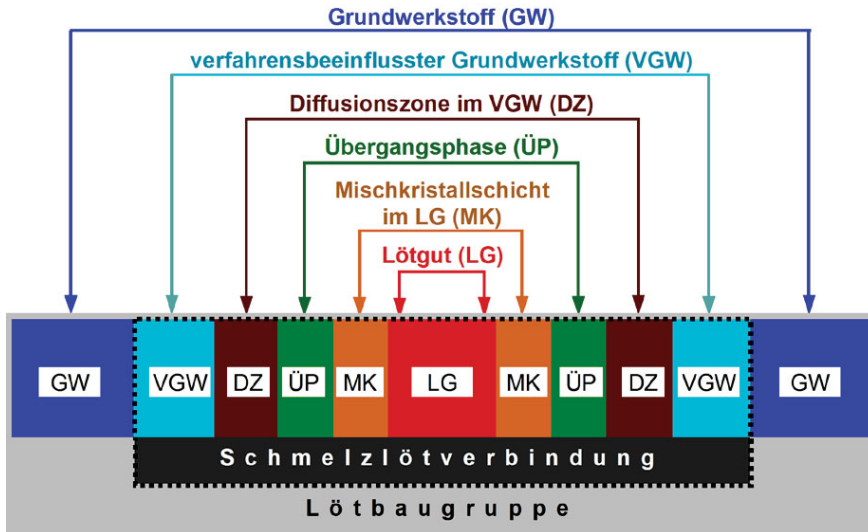


Abb. 2.5 Mögliche Werkstoffbereiche in Schmelzlötverbindungen

Diese Veränderungen beruhen auf der Wirkung der verschiedenen Temperaturen und Temperaturzyklen. Deshalb ist das Verständnis aller an der Lötfertigung beteiligten Arbeitskräfte für diese in der Löttechnik relevanten stoffspezifischen und prozessspezifischen Temperaturen unbedingt erforderlich und wichtig. Die Ausdehnung der einzelnen Bereiche ist in starkem Maße von der Größe des eingestellten Montagespaltes abhängig (Abb. 2.6).

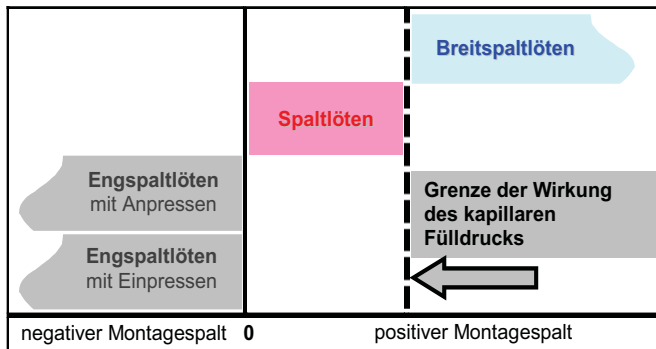


Abb. 2.6 Einfluss des Montagespaltes auf die Werkstoffbereiche beim Löten

Nach dieser kurzen Einführung werden im Folgenden die Anwendung bzw. Entwicklung der konventionellen und insbesondere der alternativen Lote beschrieben.

3. Fertiglotte zum Schmelzlöten von Fe-Grundwerkstoffen

3.1. Konventionelle Fertiglotte zum Untersolidus-Schmelzlöten von Fe-Grundwerkstoffen

In Deutschland steht die Automobilindustrie mit 45 % Marktanteil im Zentrum vieler technischer Entwicklungen [Auto-08] – siehe [Abb. 3.1](#).

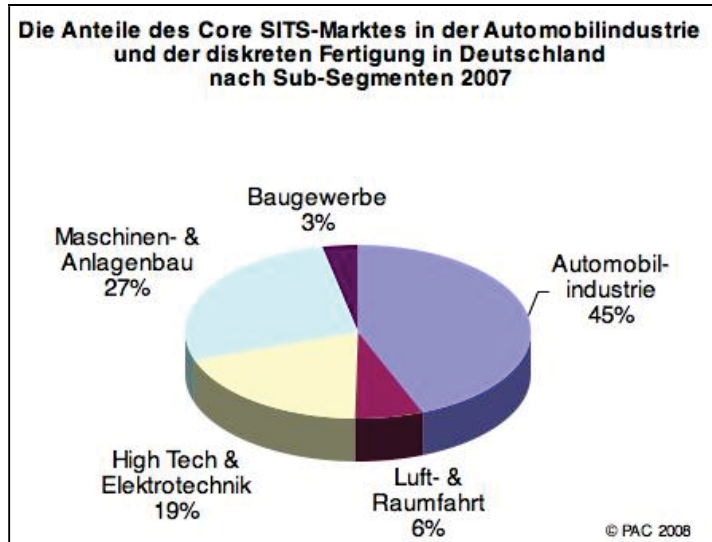


Abb. 3.1 Marktanteile ausgewählter Industriezweige in Deutschland

Dabei bestimmt neben dem Schweißen auch die Fertigung von Lötverbindungen den technischen Fortschritt. Neben den Kunststoffen werden in der Automobilindustrie insbesondere Stähle bzw. hochfeste Stähle, Aluminium und Magnesium sowie Kupfer, Nickel und Titan als metallische Grundwerkstoffe angewendet ([Abb. 3.2](#))

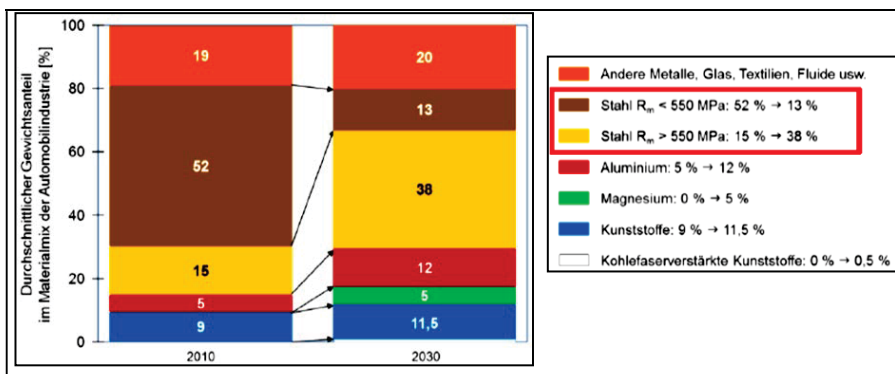


Abb. 3.2 Applizierte Werkstoffpalette in der Automobilindustrie

Konventionelle und alternative Lote zum Schmelzlöten von Metallen

Deshalb sollen hier auch diese Metalle und ihre entsprechenden Legierungen bevorzugt betrachtet werden.

Das Untersolidus-Schmelzlöten ist das typische konventionelle Löten, wie es bereits in der Vergangenheit und bis heute in der Industrie, im Handwerk oder im Heimwerkerbereich weltweit unter Nutzung von Fertiglöten überwiegend angewendet wurde bzw. wird (Abb. 3.3).

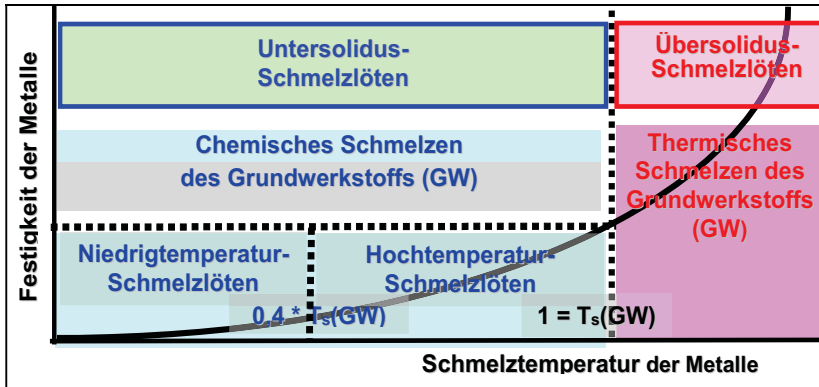


Abb. 3.3 Erweiterung der Lötverfahren durch Unter- und Übersoliduslöten

Die Erweiterung der Lötverfahren um die zwei Verfahrenshauptgruppen "Untersolidus-Schmelzlöten" und "Übersolidus-Schmelzlöten" ist notwendig, weil in einigen Fällen insbesondere durch das Übersolidus-Schmelzlöten von Mischverbindungen (z. B. Al mit Stahl) auch gezielt durch ein thermisches (An-) Schmelzen des Grundwerkstoffs bzw. der Grundwerkstoffe begleitet wird. Damit erfolgt ein intensives aber lokales thermisches Schmelzen des Grundwerkstoffs und es entsteht als Lötgut ein Gemisch aus geschmolzenem Grundwerkstoff und geschmolzenem Lot. Dagegen wird beim Übersolidus-Schmelzlöten sogar ein Lot mit einer Schmelztemperatur über der des Grundwerkstoffs, mit den gleichen metallurgischen Folgen, verwendet. Die damit erreichbaren Legierungseffekte werden von den Autoren im Abschnitt "Übersoliduslote" als alternative Lote näher betrachtet. Das Übersoliduslöten führt zu Lötverbindungen mit der Verbindungswertigkeit = 1 und wurde von den Autoren intensiv untersucht, zur industriellen Anwendung empfohlen und publiziert [Witt-01.2].

Wichtig ist in diesem Zusammenhang das richtige Verständnis für die metallurgischen Prozesse während des Schmelzlötens, die zur Bildung des Lötgutes (LG) aus dem Lot und dem Grundwerkstoff sowie zur Bildung des verfahrensbeeinflussten Grundwerkstoffs (VGW) aus dem Grundwerkstoff führen (Abb. 3.4).

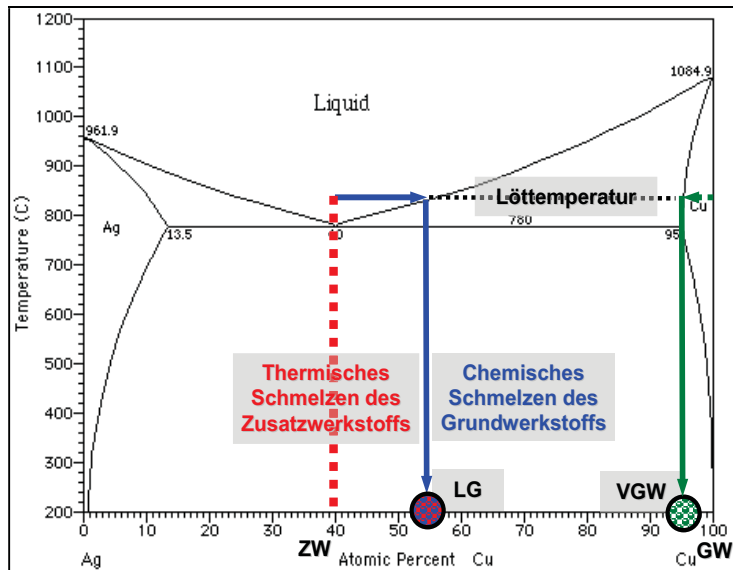


Abb. 3.4 Metallurgische Prozesse beim Schmelzlöten

Das Lötgut legiert sich auf Grund des chemischen Schmelzens des Grundwerkstoffs anteilig mit den entsprechenden Legierungskomponenten auf (Cu → Lötgut, LG) und der Grundwerkstoff mit den entsprechenden Legierungskomponenten des Lotes (Ag → verfahrensbeeinflusster Grundwerkstoff, VGW). Das chemische Anschmelzen wird bisher wenig beachtet und z. T. mit den Begriffen Erosion, Lösen oder Ablegieren beschrieben. Das chemische Schmelzen des festen Grundwerkstoffs durch die flüssige Lotschmelze ist eine der unbedingten Voraussetzungen für das Fertigen von qualitätsgerechten Schmelzlötverbindungen³. In diesem Zusammenhang sollte nach Meinung der Autoren auch die mögliche Fertigung von sogenannten "Adhäsionslötverbindungen", wie sie in [Petr-03] beschrieben wurden, noch einmal genau überdacht werden.

Für das Niedrigtemperatur-Untersolidus-Schmelzlöten (historisch bedingt in der Literatur als "Weichlöten" bezeichnet) und das Hochtemperatur-Untersolidus-Schmelzlöten (historisch bedingt in der Literatur als "Hartlöten" bezeichnet), werden die entsprechenden Fertiglote mit Schmelztemperaturen unter der Schmelztemperatur der zu lötenen Grundwerkstoffe verwendet. Auf diese Fertiglote, unter anderem auch für Fe-Legierungen als Grundwerkstoff, sei z.B. mit den Quellen [Hump-93], [Lasc-77], [Lasc-88], [Lozm-75], [Müll-95], [Petr-03], [Ruza-78], [Woda-73], [ISO17672] und [Muss-12] verwiesen. In der folgenden Tafel sind nach [Müll-95] einige Fertiglote für Fe-Grundwerkstoffe angeführt (Abb. 3.5).

³ Man könnte als Leitsatz formulieren: "Ohne Lösen kein Löten"

Weichlote	Hartlote	
Zinnlote	Ag-Lote	L-Ag56Sn5
L-Sn90Pb	Ni-Lote	L-Ag56InNi
L-Sn63Pb	Pd-Lote	L-Ag55Sn2
L-Sn60Pb	Cu-Lote	L-Ag50CdNi
L-PbSn40	CuZn-Lote	L-Ag49
L-PbSn30	Cu-Ni-Mn-Lote	L-Ag40Cd
L-PbSn2	L-Ag72	L-Cu90Ge

Abb. 3.5 Beispiele von Fertigloten für Fe-Grundwerkstoffen [Müll-95]

Nach DIN 8513 werden diese arteigenen oder aber auch artfremden Fertiglote nach dem Hauptlegierungselement zusammengefasst beschrieben, wie z. B. L-Ag72 (L für Lot), wobei nach ISO 3677 zusätzlich auch weitere Legierungselemente oder die Schmelztemperatur mit angegeben werden können – wie z. B. B Ag72Cu 780 (B für Brazing Alloy).

Für die Anwender des Schmelzlötens sind die Hinweise auf die verschiedenen Grundwerkstoffe mit Zuordnung der möglichen Fertiglote für das Schmelzlöten besonders wichtig. Noch besser sind jedoch Angaben zu den Fertigloten, die gleichzeitig nach Grundwerkstoffen und Lötbaugruppen geordnet sind. Solche wichtigen Hinweise sind z. B. in [Petr-03] enthalten. In diesen und anderen hier nicht genannten Quellen werden auch wichtige Angaben zu bestimmten metallurgischen und technischen Eigenschaften der zum Schmelzlöten vorgesehenen Fertiglote gemacht. Dazu zählen die chemische Zusammensetzung, die Temperatur des Beginns des Schmelzens des Lotes, die Solidustemperatur, die Temperatur des Endes des Schmelzens des Lotes, die Liquidustemperatur, die Scher- und Zugfestigkeit der an ausgewählten Grundwerkstoffen gefertigten Schmelzlötverbindungen u. a. Zusätzlich sind manchmal auch die Werte für die Wärmeleitfähigkeit angeführt.

Leider können in den Fertiglot-Normen prinzipiell nur die Eigenschaften der Lotlegierungen ausgewiesen werden. Die ebenfalls wichtigen Eigenschaften der aus den verschiedenen Fertigloten gefertigten Schmelzlötverbindungen, wie die Auslöttemperatur und Wiederaufschmelztemperatur, können nicht ausgewiesen werden. Das sind aber insbesondere für temperaturbelastete Lötverbindungen wichtige technische Funktionseigenschaften. Zu diesem Zweck wurde bereits 1976 in der damaligen UdSSR eine entsprechende Prüfnorm [GOST21547] erarbeitet. In dieser Norm wurden für die Schmelzlötverbindungen die entsprechenden Proben und die Prüfeinrichtung festgelegt, die für den industriellen Gebrauch im Gebiet der Gemeinschaft Unabhängiger Staaten (GUS) Gültigkeit besitzt (Abb. 3.6).