

# Handbuch Lötverbindungen

Klaus Wittke und Wolfgang Scheel

1. Auflage 2011

- Fachverlag für
- Oberflächentechnik – Galvanotechnik
  - Produktion von Leiterplatten  
und Systemen  
(Baugruppenteknik)

EUGEN G.  
LEUZE  
VERLAG

---

109 JAHRE 1902 – 2011

BAD SAULGAU  
GERMANY

## Absolute Löttemperatur beim Löten – Lötverfahren

5.2.6

- ▶ Merkmale zur Einteilung der Lötverfahren – 5.2.1
- ▶ Löten nach dem Stand der Technik vor der Norm – 5.1.2

### D

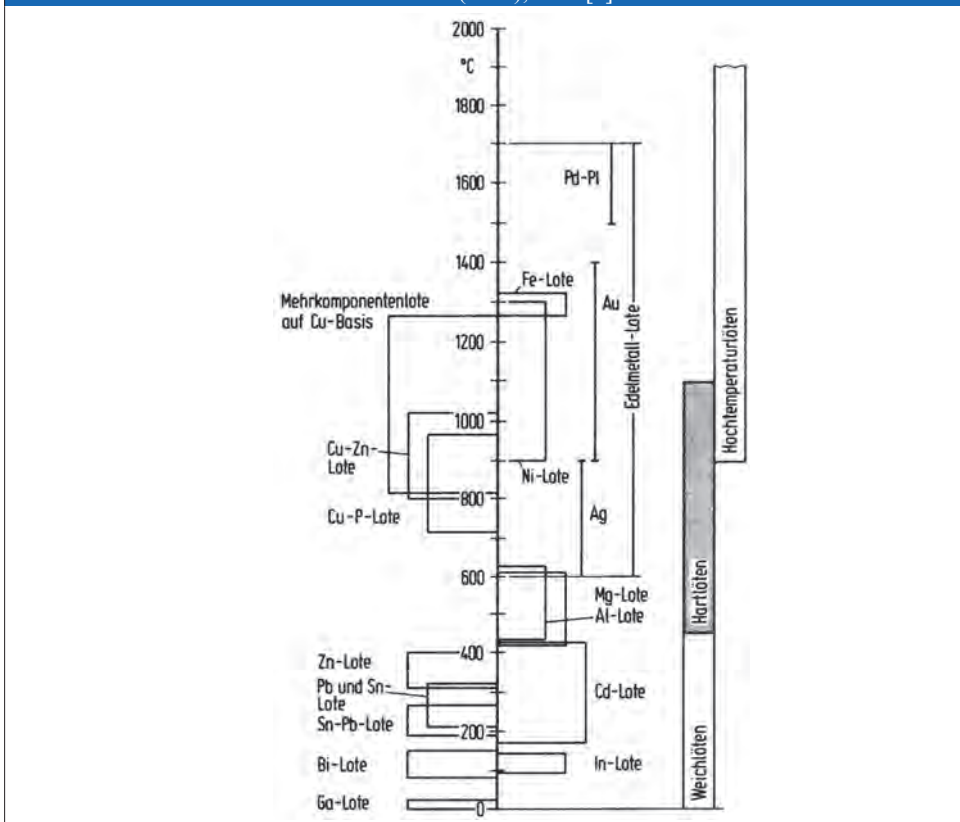
Einteilung der Lötverfahren nach absoluten Temperaturen – DIN 8505:

Weichlöten ist Löten mit Loten, deren Liquidustemperatur unterhalb 450 °C liegt.

Hartlöten ist Löten mit Loten, deren Liquidustemperatur oberhalb 450 °C liegt.

Hochtemperaturlöten ist flussmittelfreies Löten unter Luftabschluss (Vakuum, Schutzgas) mit Loten, deren Liquidustemperatur oberhalb 900 °C liegt → Bild.

Lötverfahren – Einteilung nach absoluter Liquidustemperatur der Lote  
DIN 8505 (1979); nach [1]



## K

Diese Einteilung der Lötverfahren erfolgt entsprechend DIN 8505-1 (1979-05) nach den absoluten Liquidustemperaturen der Lote und zwar mit einem Grenzwert von 450 °C. Die im Bild aus dem Jahr 1986 gezeigte Zuordnung ausgewählter Lote zu diesen Lötverfahren enthalten auch die heute nicht mehr empfohlenen Kadmiumlote (▶ schadstoffarme Fertigung). Neben dieser Besonderheit wird im Bild abweichend von der Norm zum Beispiel das Schutzgas- oder Vakuumlöten von Stahl mit Kupferlot (Schmelztemperatur weit über 900 °C) als Hartlöten und nicht als Hochtemperaturlöten bezeichnet. Die kritische Temperatur von 450 °C ist historisch bedingt und entspricht der für Eisen beziehungsweise Stahl kritischen homologen Rekristallisationstemperatur mit einem Wert von 0,4. Dieser Wert berechnet sich für Eisen über seine Schmelztemperatur von 1538 °C wie folgt aus den entsprechenden Absoluttemperaturen:

$$(450+273) / (1538+273) = 0,399 \sim 0,4!$$

Oberhalb dieser kritischen homologen Temperatur von 0,4 beginnt beim Löten die intensive Veränderung der Eigenschaften und des Gefüges von Eisen beziehungsweise Stählen insbesondere aufgrund der Rekristallisation. Deshalb war diese Temperatur von 450 °C für die Altväter der Löttechnik auch ein kritischer Wert. Die Übertragung dieses Wertes ist für andere metallische Werkstoffe nicht möglich. So beginnt für die kritische homologe Temperatur von 0,4 das *Hartlöten* zum Beispiel für Aluminium schon bei 100 °C, für Kupfer ab 270 °C, für Molybdän erst ab 885 °C und für Wolfram sogar erst bei 1205 °C.

Außerdem wird bei dieser Einteilung der Lötverfahren nach der Norm immer nur vom Schmelzlöten über ein geschmolzenes Lot ausgegangen. Damit werden aber die anderen möglichen Varianten wie das Presslöten und Kondensationslöten in der Norm nicht berücksichtigt.

## Q

- [1] E. Lugscheider, H. Pelster: Fügen durch Löten, In: Handbuch der Fertigungstechnik, Bd. 5, Fügen, Handhaben und Montieren (Herausgeber G. Spur). Carl Hanser Verlag, München-Wien 1986

### Adaptive Presslötverbindungen zur Verbesserung der Verbindungswertigkeit – Eigenschaften 3.4.6.4

- ▶ Systemeigenschaften der Lötverbindung – 3.4.1
- ▶ Verbindungswertigkeit zur Bewertung der Qualität – 3.3.5
- ▶ Verbindungswertigkeit mit niedrigen Werten als prinzipieller Mangel der Lötverbindungen – 3.4.5

## D

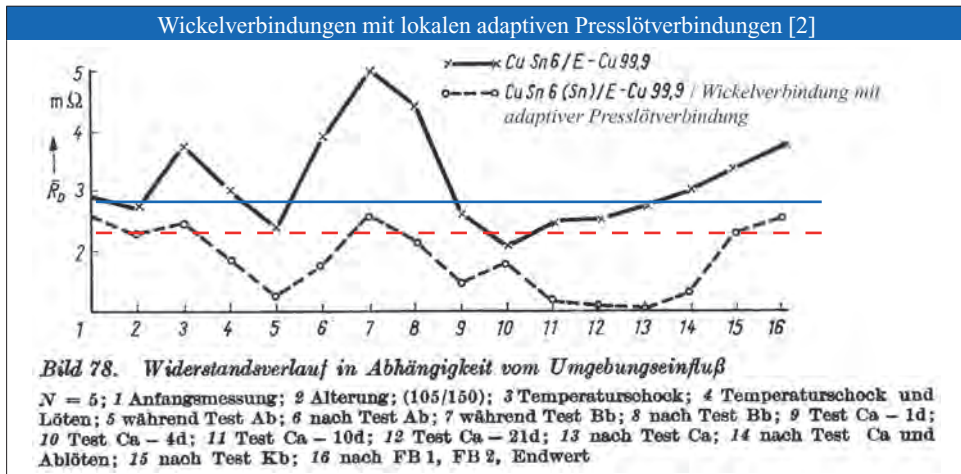
Anwendung von lokalen Presslötverbindungen bei der Fertigung von Kraftschlussverbindungen mit sich bei Betriebsbedingungen vergrößernden Lötflächen in der Fügebaugruppe zur bestmöglichen Annäherung der auf die Eigenschaften des Grundwerkstoffs beziehungsweise des verfahrensbeeinflussten Grundwerkstoffs bezogenen Verbindungswertigkeit der Fügeverbindung an den Wert 1 [1].

## K

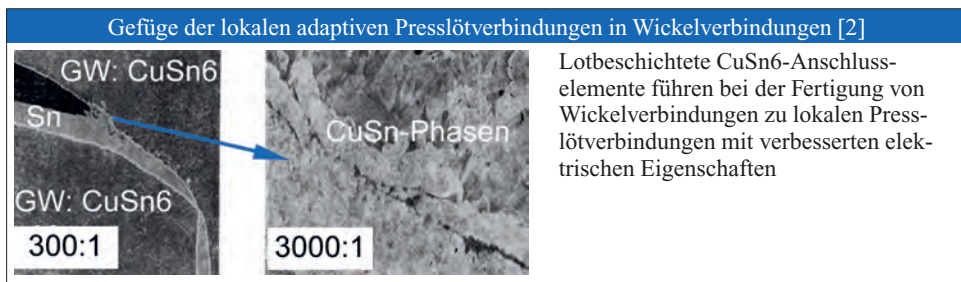
Die Fertigung von Kraftschlussverbindungen in entsprechenden Fügebaugruppen führt aufgrund der weiterwirkenden Flächenpressung zum dauerhaften mechanischen Kontakt in diesen Verbindungen. Durch die Anwendung von zusätzlichen lokalen Presslötverbindungen werden kombinierte Löt-Kraftschluss-Verbindungen gefertigt, wobei dazu zumindest eine Anschlussfläche vorher mit einem entsprechenden Lot beschichtet wurde. Unter Betriebsbedingungen kann dann unter Einfluss der Betriebsspannungen und/oder erhöhten Betriebstemperaturen aufgrund von Diffusionsprozessen ein laterales Wachstum der Lötflächen erfolgen. Dabei können sich in den gefertigten inneren Grenzflächen in Abhängigkeit vom gewählten Werkstoffsystem auch neue Phasen zwischen dem Grundwerkstoff und Löt-Zusatzwerkstoff bilden.

## B

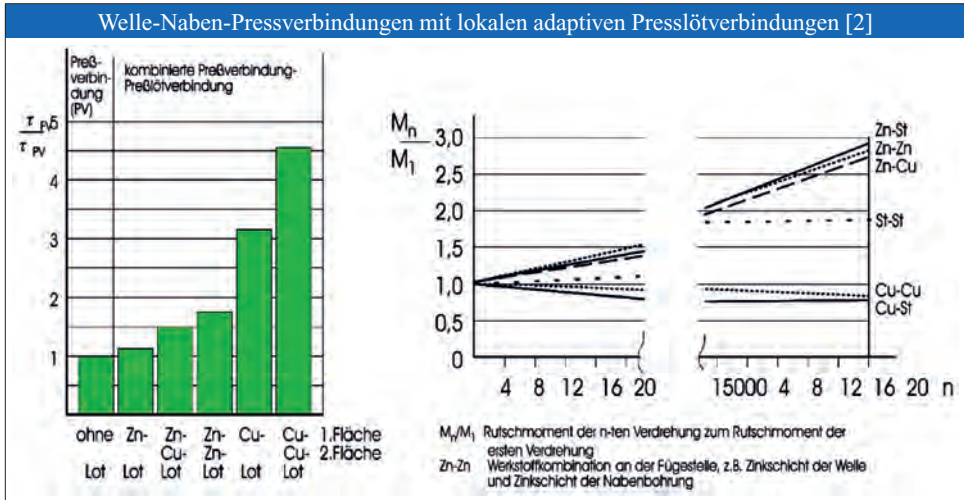
Ein Beispiel für die Anwendung von solchen adaptiven Presslötverbindungen in der Elektrotechnik ist die Fertigung von Wickelverbindungen mit einer entsprechenden Beschichtung → Bild.



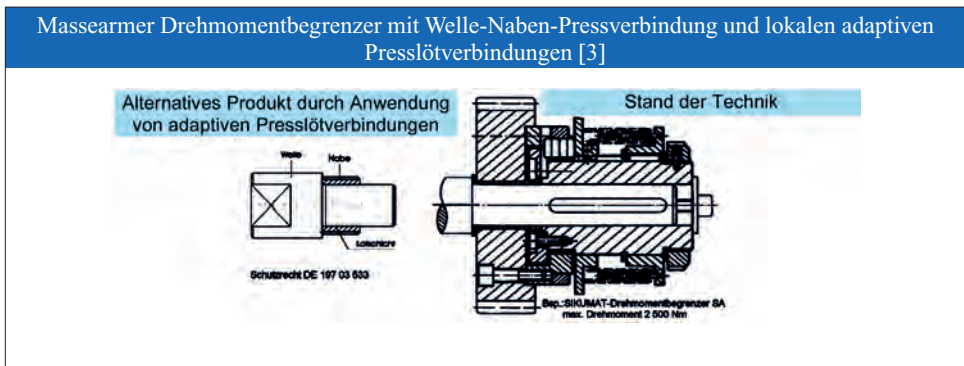
Hier erfolgt die adaptive Verbesserung der systemspezifischen Verbindungseigenschaften durch die bei Belastung infolge der Diffusion ständig wachsenden Flächenanteile der Presslötverbindungen in der hier vorliegenden kombinierten Kraftschluss-Formschluss-Verbindung → Bild.



Auch im Maschinenbau werden zunehmend Kraftschlussverbindungen mit lokalen adaptiven Presslötverbindungen angewendet – siehe auch ► Lötverbindungen – kombinierte Löt-Kraftschluss-Verbindung → Bild.



Die Anwendung dieser Verfahrensvariante führt zu massearmen Produkten und einer aufwandsarmen Fertigung → Bild.



- [1] K. Wittke, W. Scheel: Verbundlote und adaptive Lötverbindungen. PLUS 1/2007, S. 151-154
- [2] W. Scheel, H.-J. Albrecht: Wickelanschlußtechnik. Verlag Technik, Berlin 1983
- [3] K. Wittke, U. Füssel: Kombinierte Fügeverbindungen. Springer-Verlag Berlin, 1996
- [2] U. Füssel, R. Beetz, M. Schnick: Multifunktionale Pressverbindungen. VDI-Berichte 1790 (2003)

## Diffusionszone – Lötparameter

7.2.7

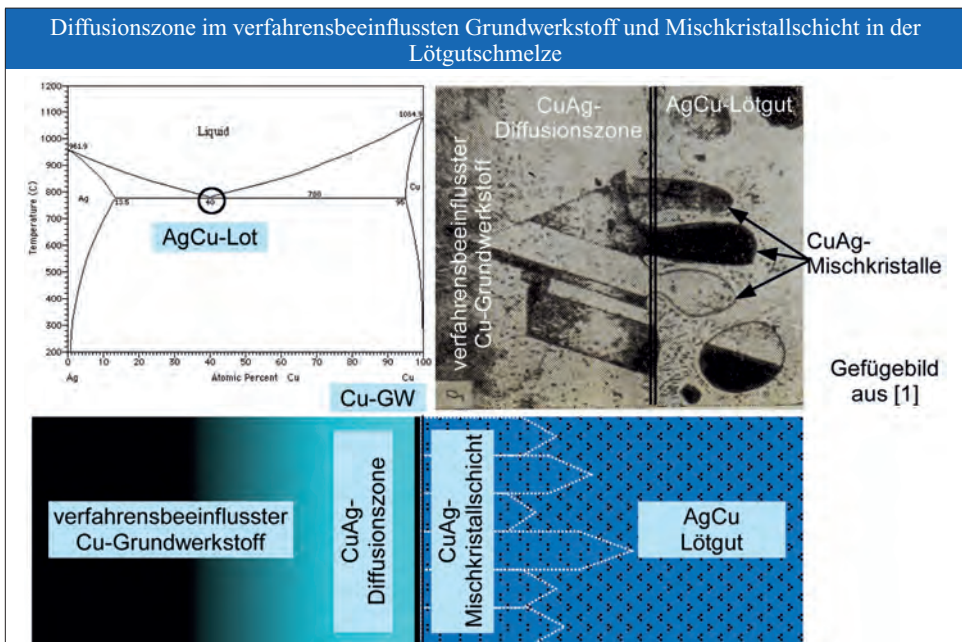
- ▶ Stofflicher Aufbau der Lötverbindungen – 7.2.1
- ▶ Lotschmelze – 7.2.3

### D

Werkstoffbereich bei Fertigung einer Lötverbindung in der Lötbaugruppe, der beim Untersolidus-Schmelzlöten ab Erreichen der Löttemperatur bis zur Abkühlung auf eine homologe Löttemperatur von 0,4 durch die Diffusion von Atomen aus der Lötgutschmelze bzw. dem Lötgut in den sich im metallurgischen Kontakt befindenden verfahrensbeeinflussten Grundwerkstoff entsteht. Gleichzeitig beginnt auch das chemische Erstarren der Lötgutschmelze bis zum Beginn der thermischen Abkühlung oder bis zum vollständigen Verbrauch der Lötgutschmelze. Beim Presslöten beginnt die Ausbildung der Diffusionszone im Moment der Stoffvereinigung und endet mit Erreichen einer homologen Löttemperatur von 0,4.

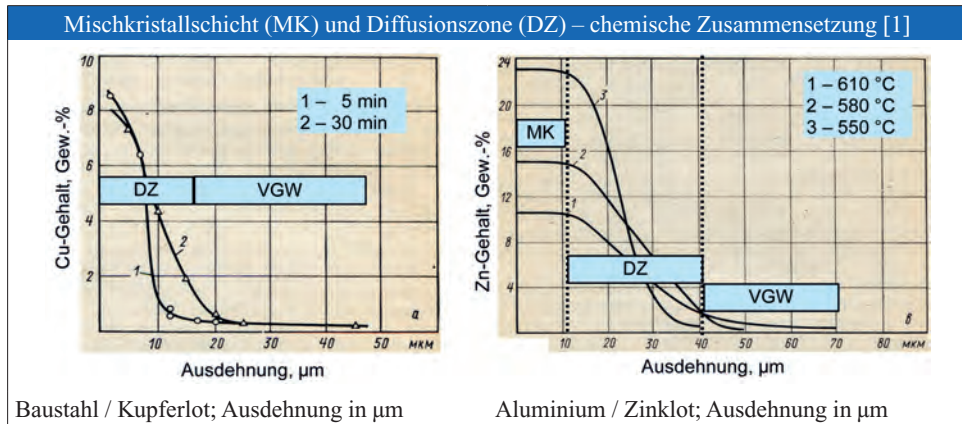
### K

In Ergänzung zum Stand der Technik muss zwischen einer Diffusionszone im verfahrensbeeinflussten Grundwerkstoff und einer Mischkristallschicht in der Lötgutschmelze unterschieden werden → Bild.





Beide Prozesse sind Ergebnis der Diffusion und laufen immer gleichzeitig ab. Die Diffusionszone aus auflegierten Grundwerkstoff-Mischkristallen entsteht beim Halten auf Löttemperatur durch Diffusion von Lotatomen in den festen und schon verfahrensbeeinflussten Grundwerkstoff. Diese diffusionsbedingte Verarmung der Lötgutschmelze verursacht ihre chemische Unterkühlung, die durch die entsprechende chemische Erstarrung von Lötgut-Mischkristallen bei Löttemperatur abgebaut wird. Die Ausdehnung der Diffusionszone wird neben dem verwendeten System aus Grundwerkstoff und Zusatzwerkstoff, insbesondere durch die Löttemperatur und Haltedauer bei Löttemperatur, bestimmt → Bild.



[1] I. E. Petrunin u. a.: Werkstoffkunde des Lötens, Verlag Metallurgija, Moskau 1976

**Durchschmelzungen in Schmelzlötverbindungen – Lötbaugruppe 3.3.4.2**

- ▶ Qualität der Lötverbindung – 3.3.1
- ▶ Fehler und Mängel in Lötverbindungen – 3.3.3
- ▶ Chemisches Schmelzen des Grundwerkstoffes – 7.2.6



Lokal begrenzte Hohlräume in zumindest einem Lötbauelement der Schmelzlötverbindungen, die während des Schmelzlötens infolge des chemischen Schmelzens bzw. Anschmelzens des Grundwerkstoffes als Ergebnis der metallurgischen Wechselwirkungen zwischen festem oder viskosem Grundwerkstoff und der flüssigen Lot- bzw. Lötgutschmelze → Bild.



## K

Auf das Durchschmelzen haben neben der Löslichkeit zwischen Lot und Grundwerkstoff insbesondere die Löttemperatur und die Haltedauer bei Löttemperatur eine besondere Bedeutung. Es sei aber darauf hingewiesen, dass beim Schmelzlöten das chemische Anschmelzen des Grundwerkstoffs (in der Fachliteratur auch Erosion, Ablegieren oder auch Lösen bezeichnet) eine Grundvoraussetzung für die Fertigung von qualitätsgerechten Schmelzlötverbindungen ist – *ohne Lösen kein Löten*.

## D

## Q

- [1] K. Iversen: Fehler beim Hart- und Hochtemperaturlöten, In: L. Dorn u. a.: Hartlöten und Hochtemperaturlöten – Grundlagen und Anwendung, expert verlag, Renningen, 2007
- [2] K. Witke, E. Bleul: Ofenlöten von Kupfer-Stahl-Verbindungen mit Silberloten an Kältemittelverdichtern. Schweißen und Schneiden (Düsseldorf) 43 (1991) 7, S. 394 - 397



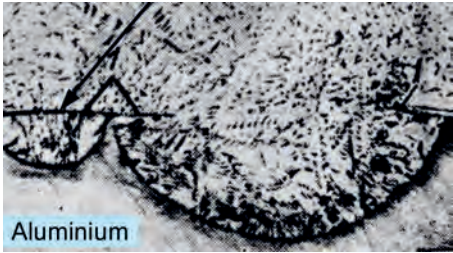
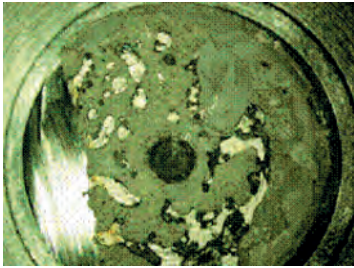
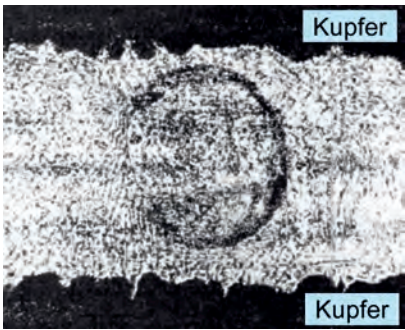
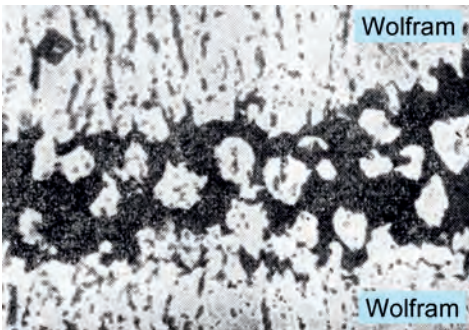
### Einschlüsse in Schmelzlötverbindungen – Lötbaugruppe

3.3.4.3

- ▶ Qualität der Lötverbindung – 3.3.1
- ▶ Fehler und Mängel in Lötverbindungen – 3.3.3

#### D

Feste nichtmetallische Werkstoffbereiche in Form von Oxiden, Flussmittelresten und/oder Schlacken sowie feste metallische artfremde und/oder arteigene metallische Werkstoffbereiche im Lötgut von Schmelzlötverbindungen → Bild.

Einschlüsse in Schmelzlötverbindungen	
<p>Oxideinschlüsse [1]</p>  <p>Aluminium</p> <p>SnZn30-Lot / 365 °C / 1 min</p>	<p>Flussmitteleinschlüsse (hell) Schlackeeinschlüsse (dunkel) [2]</p>  <p>CuMn23,5Ni9-Reaktionslotpulver</p>
<p>arteigener Metalleinschluss [3]</p>  <p>Kupfer</p> <p>Kupfer</p> <p>CuAg-Fertiglot; 800 °C / 1 min / Wasserstoff</p>	<p>artfremder Metalleinschluss [4]</p>  <p>Wolfram</p> <p>Wolfram</p> <p>NiCrSi-Fertiglot</p>

#### K

Ungewöhnlich sind heute eigentlich nur die arteigenen Metalleinschlüsse, da die anderen Einschlussarten zum Stand der Technik zählen. Solche Einschlüsse bilden sich nach [3] entsprechend der *Theorie der Übergangsprozesse* von *J. Frenkel*, wonach in einer Ur-

**D**

Innere Grenzfläche auf den Außenflächen der Festkörper zwischen dem Werkstoffbereich mit Verformungsgefüge und der unter irdischen Bedingungen unvermeidlichen Reaktionsschicht, die für den Lötprozess durch eine Oberflächenaktivierung zur Entfernung der Reaktionsschicht freigelegt werden muss.

**K**

Auch wenn man das Freilegen der Festkörperoberflächen in der Lötzone durch die Grenzflächenvorbehandlung und anschließende Oberflächenaktivierung voraussetzt, kann bei Annäherung der beiden Anschlussflächen trotzdem keine selbstständige Stoffvereinigung durch Löten erfolgen. Das erklärt sich aus dem geometrischem Aufbau der technischen Oberflächen nach der Teilefertigung. Es ergeben sich unvermeidbare Abweichungen von der Idealgestalt der Oberflächen. Diese Abweichungen werden in der DIN 4670 als Gestaltabweichungen beschrieben:







- 1. Ordnung: Formabweichung wie beispielsweise Geradheitsabweichungen durch Einspann- oder Führungsfehler
- 2. Ordnung: Welligkeit wie beispielsweise Wellen aufgrund von Schwingungen, Unrundlauf oder Unwuchten
- 3. Ordnung: Rauheit wie beispielsweise Rillen durch Werkzeugschneidenradius und Vorschub
- 4. Ordnung: Rauheit wie beispielsweise Riefen, Schuppen und Kuppen aufgrund von Spanbildungs- und Schervorgängen usw. → Bild (nächste Seite, oben)

Auch wenn Formabweichungen und Welligkeiten ausgeschlossen werden, haben die technischen Oberflächen für das selbstständige Löten immer noch ein zu großes Rauheitsprofil → Bild (nächste Seite, unten).

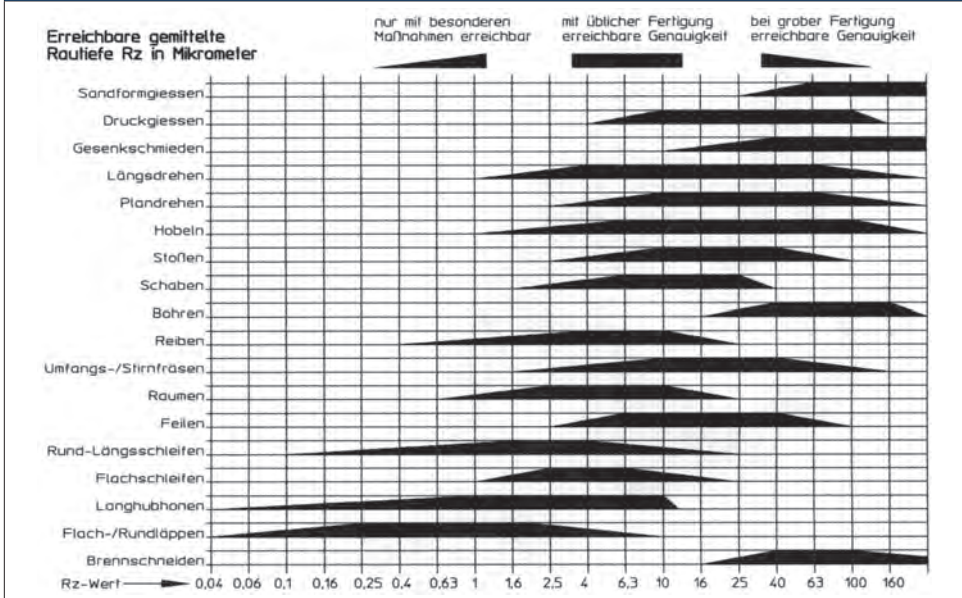
Die mit den Verfahren der Teilefertigung herstellbaren Rautiefen als Gestaltabweichungen 3. und 4. Ordnung sind sogar bei bestmöglicher Oberflächenbearbeitung wie beispielsweise mittels Polieren immer noch für einen unmittelbaren Stoffschluss zu groß → Bild (übernächste Seite, oben).

Dafür sind immer noch mindestens 2 x 70 fehlende Atomschichten durch entsprechende Lötprozesse mit festen, flüssigen und/oder dampfförmigen Löt-Zusatzwerkstoffen zu füllen beziehungsweise eine ausreichende plastische Verformung der Oberflächenbereiche zu realisieren!

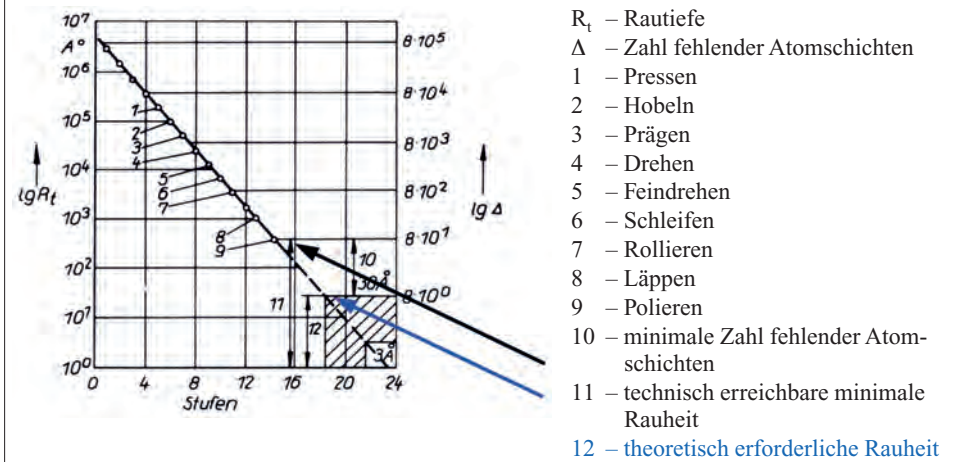
## Gestaltabweichungen nach DIN 4670

Gestaltabweichungen	Skizze	Entstehungsursachen
1. Ordnung Formabweichung	Geradheitsabweichung 	Einspannfehler an der Werkzeugmaschine Führungsfehler Verformungen
2. Ordnung Welligkeit	Wellen 	Schwingungen Unrundlauf von Spindeln Unwucht bei Drehbewegungen
3. Ordnung Rauheit	Rillen 	Werkzeugschneidenradius Vorschub
4. Ordnung Rauheit	Riefen, Schuppen, Kuppen 	Spanbildungsvorgänge Schervorgänge
5. Ordnung Rauheit	Korn Grenzen 	Korngrenzenrißbildung Kristallisationsvorgänge
6. Ordnung nicht mehr darstellbar	Gitteraufbau des Werkstoffes 	Gitterdefekte: Leerstellen Zwischengitteratome Versetzungen

## Rautiefen bei unterschiedlichen Fertigungsverfahren [1]



### Rautiefen für einen selbständigen Stoffschluss [2]



### Q

- [1] G. Fleig: Arbeitsplanung – Oberflächenangaben, Gewerbliche und Hauswirtschaftliche Schulen, Schramberg, 129.143.232.75/cms/fileadmin/pdfs\_docs/Materialien/ap3igk04.pdf
- [2] K. Wittke: Löten, Wissenschaftliche Schriftenreihe der Technischen Hochschule Karl-Marx-Stadt, 10/1980

## Oberflächen des Festkörpers – Grundlagen

1.2.1

### ► Grenzflächen des Festkörpers – 1.2.2

### D

Theoretisch die von unter irdischen Bedingungen unvermeidbaren festen Reaktionsprodukten und umweltbedingten festen, flüssigen und/oder gasförmigen Partikeln befreiten Außenflächen des metallischen Festkörpers, die praktisch nur durch eine Grenzflächenvorbehandlung und anschließende Oberflächenaktivierung zur sofortigen Weiterverarbeitung in-situ hergestellt oder aber durch eine Passivierung temporär gelagert werden können.

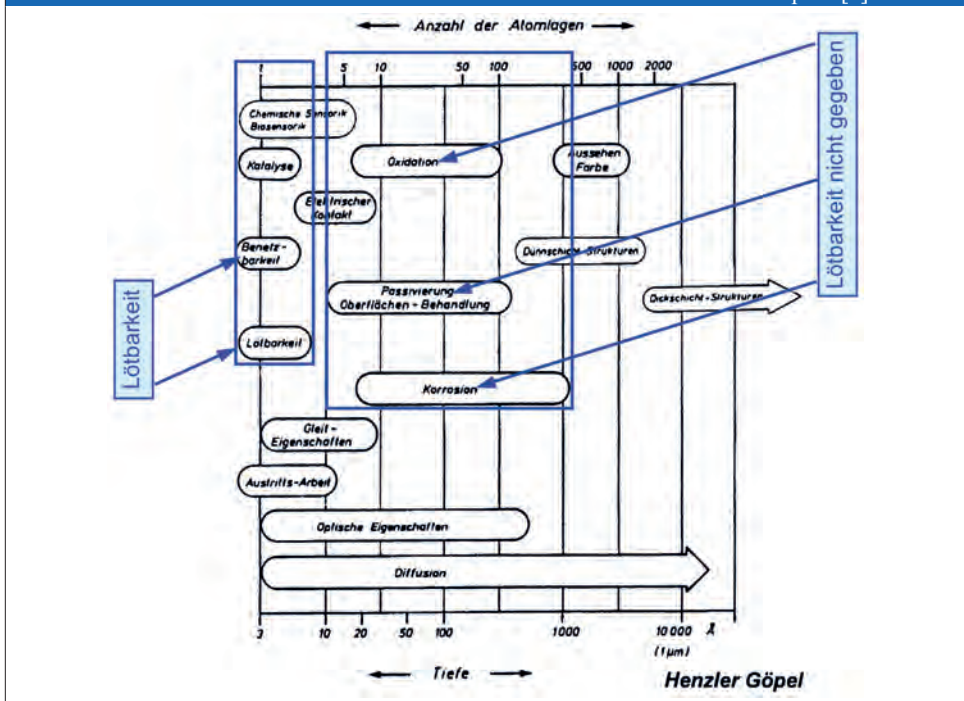
### K

Unter irdischen Bedingungen bilden sich auf den Oberflächen des metallischen Festkörpers immer chemische Verbindungen der festen Grund- und Zusatzwerkstoffe insbesondere mit dem Sauerstoff, Stickstoff und Wasserdampf aus der umgebenden Luft. Sie bilden die äußere Grenzfläche des Festkörpers. Diese Reaktionsschichten bestehen aus sehr vielen Atomlagen, die das unmittelbare Stoffvereinigern durch Löten und insbesondere durch Schmelzlöten behindern und meistens sogar verhindern → Bild (nächste Seite, oben).

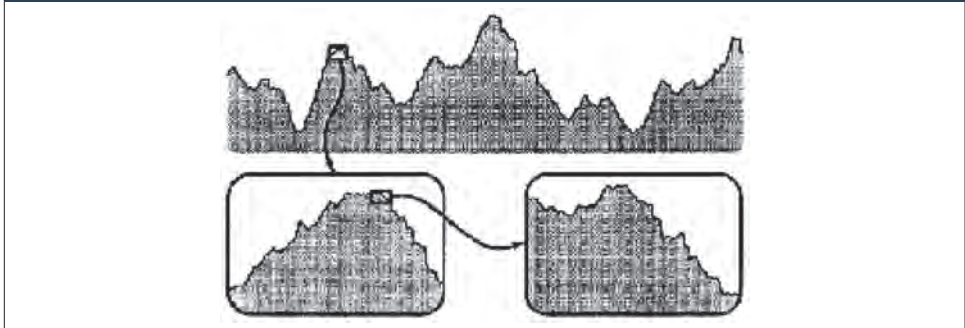
Die reale Festkörperoberfläche mit dem entsprechendem Ausgangs- und Verformungsgefüge zeichnet sich weiterhin durch ein fertigungsbedingtes kompliziertes Makro- und Mikrorelief aus, das sich insbesondere bei der Fertigung von Presslötverbindungen störend auswirken kann → Bild (nächste Seite, unten).



## Tiefenbereiche verschiedener Prozesse auf den Oberflächen von Festkörpern [1]



## Topologie einer realen Oberfläche [2]



- [1] M. Wolf: Festkörperphysik II: Einführung in die Oberflächenphysik und zeitaufgelöste Festkörperspektroskopie, Freie Universität Berlin, [users.physik.fu-berlin.de/~femtoweb/newfemtos/teaching/SS06-Wolf-Festk-II/material/einfuehrung.pdf](https://users.physik.fu-berlin.de/~femtoweb/newfemtos/teaching/SS06-Wolf-Festk-II/material/einfuehrung.pdf)
- [2] [www.ubka.uni-karlsruhe.de/cgi-bin/psview?document=/2003/bau-geo/11&search=/2003/bau-geo/11](http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/cgi-bin/psview?document=/2003/bau-geo/11&search=/2003/bau-geo/11)

## Oberflächenaktivierung bei Normaldruck durch chemisches Potenzial, mechanische Arbeit und thermische Energie – Lötmaterialien

6.4.6

- ▶ Lötmaterialien als Element des Lötprozesses beim Löten – 4.1.2.2
- ▶ Löt-Hilfsstoff – 6.4

### D

Zerstörung der Reaktionsschicht auf der Oberfläche des Grundwerkstoffs beziehungsweise der Barrierschicht durch die dispergierende Wirkung der sich aufgrund des chemischen Potentials zwischen Grundwerkstoff beziehungsweise Barrierschicht und Lotschmelze bildenden Reaktionslotschmelze zwischen Grundwerkstoff und Reaktionsschicht, durch die dispergierende Wirkung von mechanischer Arbeit mittels Festkörperpressung zwischen festen und/oder viskosen Reaktionslotkomponenten sowie Zerstörung beziehungsweise Abbau der Reaktionsschicht auf der Oberfläche des Grundwerkstoffs beziehungsweise der Barrierschicht und des Löt-Zusatzwerkstoffes bei Normaldruck oder Unterdruck durch das ausdehnungsbedingte Dispergieren der Oxide, der Sublimation der Metalle, der Dissoziation der Oxide, des Verdampfens der Oxide beziehungsweise Metalle und/oder der Innenoxidation des Grundwerkstoffs aufgrund der Wirkung der thermischen Energie mittels Erwärmung bis auf Löttemperatur und Abtransport der festen Reaktionsschichtpartikel in das flüssige Lötgut → Bild.

Chemo-mechano-thermische Oberflächenaktivierung beim Löten unter Druck					
Aktivierungsstoff			Konservierungsstoff		
Grundwerkstoff bzw. Barrierschicht feste und/oder viskose Reaktionslotkomponenten			Ölbäder Salzbäder Dampfbäder neutrale Schutzgase		
... durch chemische Oberflächenaktivierung aufgrund von ...					
Dispergieren der Oxide	Lösen der Oxide	Bilden von löslichen Reaktionsprodukten	Freisetzen von Metallen mittels Austauschreaktionen		
... durch mechanische Oberflächenaktivierung aufgrund von ...					
Dispergieren der Oxide durch Festkörperschleifen		Dispergieren der Oxide durch Flüssigkeitskavitation		Dispergieren der Oxide durch Festkörperpressung	
und durch thermische Oberflächenaktivierung aufgrund von...					
Fehlanspannung der Ausdehnung	Sublimation der Metalle	Dissoziation der Metalloxide	Verdampfen der Metalloxide	Verdampfen der Metalle	Innenoxidation der Grundwerkstoffe

### K

Diese Aktivierungsvariante beim Schmelzlöten mit festen und/oder viskosen Reaktionsloten verlangt immer die Anwendung eines ausreichenden Lötendrucks zumindest bei Beginn des chemischen Schmelzens und Bildung des flüssigen Reaktionslotes.

**Oberflächenaktivierung bei Normaldruck durch mechanische Arbeit und thermische Energie – Lötmaterialien**

6.4.5

- ▶ Lötmaterialien als Element des Lötprozesses beim Löten – Lötfertigung – 4.1.2.2
- ▶ Löt-Hilfsstoff – Lötmaterialien – 6.4

**D**

Zerstörung der Reaktionsschicht auf der Oberfläche des Grundwerkstoffs beziehungsweise der Barrierschicht durch die dispergierende Wirkung von mechanischer Arbeit mittels Festkörperschleifen fester oder viskoser Aktivierungsstoffe, mittels Flüssigkeitskavitation oder mittels Festkörperpressung im Lotbad oder in der Lotschmelze sowie Zerstörung beziehungsweise Abbau der Reaktionsschicht auf der Oberfläche des Grundwerkstoffs beziehungsweise der Barrierschicht und des Löt-Zusatzwerkstoffes bei Normaldruck oder Unterdruck durch das ausdehnungsbedingte Dispergieren der Oxide, der Sublimation der Metalle, der Dissoziation der Oxide, des Verdampfens der Oxide beziehungsweise Metalle und/oder der Innenoxidation des Grundwerkstoffs aufgrund der Wirkung der thermischen Energie mittels Erwärmung bis auf Löttemperatur und Abtransport der festen Reaktionsschichtpartikel in das flüssige Lötgut → Bild.

Mechano-thermische Oberflächenaktivierung bei Normaldruck in flüssigen Loten					
Aktivierungsstoff			Konservierungsstoff		
Grundwerkstoff bzw. Barrierschicht metallische Werkzeuge, Bürsten, Schaber, Gewebe, Partikel, Reaktionslotpartikel nichtmetallische Werkzeuge, Bürsten, Schaber, Gewebe, Partikel Lotbad Lotschmelze			Lotbad Lotschmelze		
... durch mechanische Oberflächenaktivierung aufgrund von ...					
Dispergieren der Oxide durch Festkörperschleifen		Dispergieren der Oxide durch Flüssigkeitskavitation		Dispergieren der Oxide durch Festkörperpressung	
... und durch thermische Oberflächenaktivierung aufgrund von ...					
Fehlanpassung der Ausdehnung	Sublimation der Metalle	Dissoziation der Metalloxide	Verdampfen der Metalloxide	Verdampfen der Metalle	Innenoxidation der Grundwerkstoffe

**K**

Diese Aktivierungsvariante wird insbesondere zum flussmittelfreien Schmelzlöten von lötkritischen Grundwerkstoffen beziehungsweise Barrierschichten bei moderaten Löttemperaturen angewendet.