

## Teilprojekt A5

### Titel

Einfluss der Fest-Flüssig-Reaktionen im Lötspalt auf  
Lötguteigenschaften und Präzision

### Projektleitung/-bearbeitung

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Bobzin, Kirsten

Projektbearbeitung: M. Sc. Alexander Schmidt

Institut für Oberflächentechnik (IOT)

### Aufgabenstellung

Nach dem heutigen Stand der Technik sind die Prozessanforderungen beim Löten von Warmarbeitsstählen mit Ni-Basisloten mittels des TLP-Bondings gegensätzlich. Bezüglich der Lötzone sind hierbei hohe Temperaturen sowie lange Haltezeiten von Vorteil. Dadurch wird die Bildung von Sprödphasen in der Lötzone verhindert. Auf der anderen Seite beeinflussen diese Parameter die mechanischen und korrosiven Eigenschaften des Grundwerkstoffs in negativer Weise durch unerwünschte Phasenumwandlungen und das einhergehenden Kornwachstum. Das Ziel des Projekts ist es, diese Gegensätze in Einklang zu bringen. Hierzu wurden zwei Kompensationsansätze entwickelt. Der erste ist ein werkstofftechnischer Ansatz und sieht eine Lotentwicklung auf Basis des industriellen Lotes Ni 620 vor. Der zweite, prozesstechnische Ansatz umfasst das stromunterstützte Löten. Dabei beschleunigt der elektrische Strom die Diffusionsvorgänge während des Lötprozesses, sodass trotz wesentlich geringerer Löttemperaturen und Haltezeiten die Bildung der Sprödphasen im Lötspalt verhindert werden kann.

Im Jahr 2018 wurden beide Kompensationsmethoden verfolgt. Hierfür wurde zunächst ein experimenteller Versuchsstand für das stromunterstützte Löten in den herkömmlichen Ofenlötprozess integriert. Ein weiteres Ziel bestand in der Identifikation von potentiell geeigneten Werkstoffkonzepten für die Lotentwicklung.

### Vorgehensweise

Zur Erarbeitung der Grundlagen des stromunterstützten Lötprozesses und der Einflussgrößen musste die konventionelle Anlagentechnik an die neuen Anforderungen angepasst werden. Die Anforderungen lassen sich in zwei Kategorien einordnen, elektrische Kontaktierung der Proben während eines Ofenlötprozesses und Messgrößenerfassung. Hierzu wurde das in Abbildung 1 dargestellte Konzept entwickelt. Der wichtigste Punkt der elektrischen Kontaktierung im Ofen ist das sichere und einfache Fixieren der Proben. Damit wird die Reproduzierbarkeit der Versuche sichergestellt. Dazu wurde ein Probenhalter hergestellt, wie in Abbildung 1 rechts dargestellt. Dieser besteht aus zwei metallischen Grundplatten und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Linearführungen. Dabei lassen sich die Grundplatten entlang der Linearführungen vertikal gegeneinander verschieben, sodass unterschiedliche Probengeometrien verwendet werden können. Durch die Verwendung von elektrisch leitfähigen und isolierenden Werkstoffen wird sichergestellt, dass der Strom nur durch die Probe fließt. Aufgrund einer ausreichenden elektrischen Leitfähigkeit bei gleichzeitiger Temperaturbeständigkeit wird Nickel als Werkstoff für die Leiter verwendet. Zur Isolation der elektrischen Leiter werden  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramikperlen eingesetzt. Die Erfassung der Temperatur und Stromstärke erfolgt mithilfe eines Messverstärkers.

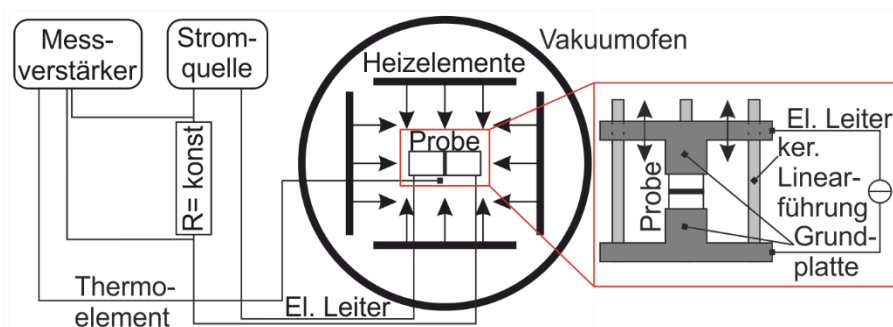


Abbildung 1: Prinzipskizze des experimentellen Versuchsaufbaus am Institut für Oberflächentechnik

Der erste Schritt bei der Lotentwicklung bestand in der Ermittlung der Anforderungen an das Lot. Hierbei musste neben der Ausbildung der Lötnaht und des Grundwerkstoffs auch die Auswirkung der Diffusionsprozesse auf den Grundwerkstoff beachtet werden. Damit lassen sich die Anforderungen an das Lot wie folgt zusammenfassen:

- Austenitisierung des Grundwerkstoffs vermeiden
- Einhalten kritischer Temperaturen ( $T = 1.040 \text{ °C}$ ) des Grundwerkstoffs
- Keine Verwendung von Austenitbildnern bzw. Ausgleich derer Wirkung durch Verwendung von Ferritbildnern
- Keine Verwendung von Bor zur Vermeidung der Ausbildung von Cr-Boriden in der Lötnaht
- Verstärkung des TLP-Effekts zur Verkürzung der Haltezeiten und Minimierung des Kornwachstums

Aufgrund guter mechanischer Eigenschaften von industriellen Ni-Loten sollte Nickel ein Basiselement des zu entwickelnden Lots sein. Um den TLP-Effekt zu erhöhen und somit die Haltezeiten zu verringern, wurde Eisen als das zweite Basiselement bestimmt. Silizium wurde aufgrund dessen Wirkung als Ferritbildner und als potentiell Diffusionselement zur Erhöhung des TLP-Effekts ausgewählt. Weiterhin ist laut Literatur Silizium als Halbmetall von Vorteil für den Herstellungsprozess der Lotfolie mittels Melt Spinning. Um eine potentielle Cr-Verarmung des Grundwerkstoffs aufgrund der Diffusionsvorgänge zu verhindern und aufgrund dessen ferritbildender Eigenschaften wurde Chrom als ein weiteres Element bestimmt. Als schmelzpunktsenkendes Element wurde Aluminium, welches ebenfalls ein Ferritbildner ist, eingesetzt. Mit den genannten Elementen wurden Vorlegierungen mit variierenden Anteilen der jeweiligen Elemente hergestellt. Um eine Vorauswahl zu treffen und die Vorlegierungen auf ihre thermische Eignung hin zu überprüfen, wurden diese mittels DSC-Analysen thermisch charakterisiert.

### Ergebnisse

In Abbildung 2 sind die Ergebnisse der durchgeführten DSC-Analysen dargestellt. Anhand dieser Ergebnisse konnten die Vorlegierungen V1.06 und V1.07 hinsichtlich der kritischen Temperatur des Grundwerkstoffs als zunächst potentiell geeignet identifiziert werden. Diese Legierungen weisen endotherme Peaks bei Temperaturen von  $T = 900 \text{ °C}$  sowie  $T = 1.040 \text{ °C}$  für den Fall V1.06 auf. Das weist auf Phasenübergänge unterhalb der kritischen Temperatur des Grundwerkstoffs hin. Für den Fall V1.07 liegt die ermittelte Temperatur des Phasenübergangs bei  $T = 950 \text{ °C}$ . Um welche Art Phasenübergang es sich hierbei handelt, ist zunächst unbekannt.

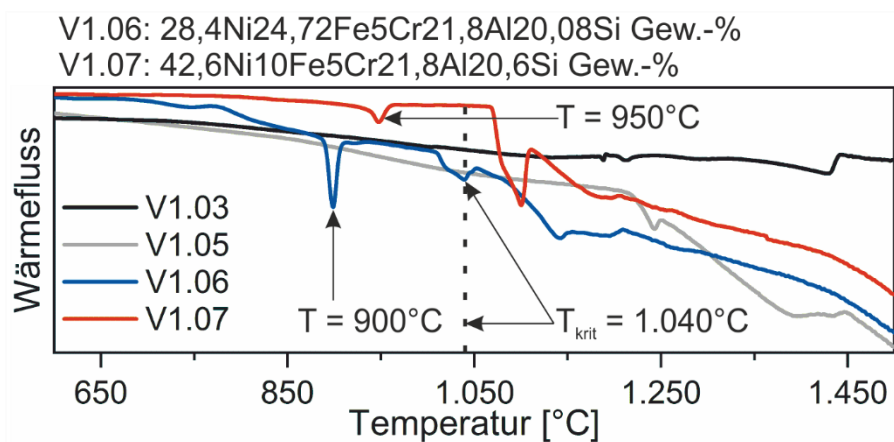


Abbildung 2: DSC-Ergebnisse der Vorlegierungen

Um die gemessenen Vorgänge bei den genannten Übergangstemperaturen besser zu verstehen, wurden in Kooperation mit B7 kritische Temperaturen der Legierungen und die vorliegenden Phasen in Abhängigkeit der Temperatur berechnet. Die dabei berechneten kritischen Temperaturen korrelieren mit den experimentell ermittelten Daten. Bei V1.06 liegt die berechnete Solidustemperatur bei  $T_s = 928^{\circ}\text{C}$  und die Liquidustemperatur bei  $T_L = 1.148^{\circ}\text{C}$ . Bei V1.07 beträgt  $T_s = 896^{\circ}\text{C}$  und  $T_L = 1.154^{\circ}\text{C}$ . Die Ergebnisse der Gleichgewichtsberechnungen zeigen, dass bei  $T_{\text{krit}} = 1.040^{\circ}\text{C}$  in beiden Legierungen neben der Schmelze zwei weitere Phasen vorliegen. Hierbei beträgt der Anteil der Schmelze bei V1.06  $x_{L,V1.06} = 33$  Gew.-% und bei V1.07  $x_{L,V1.07} = 25$  Gew.-%. Damit ist die Legierung V1.06 als Lot potentiell besser geeignet. Jedoch besteht auch hier die Möglichkeit, dass der für konventionelle Lötprozesse geringe Anteil der Schmelze in unzureichender Benetzung des Grundwerkstoffs resultiert.

Um dem entgegenzuwirken und den Anteil der Schmelze zu kompensieren, können stromunterstützte Benetzungsversuche mit dem in Abbildung 3 gezeigten Versuchsstand durchgeführt werden. Bei den bisherigen Versuchen wurde Kupfer als Lot und 1.0036 als Grundwerkstoff verwendet. Für diese Versuche wurde der ursprünglich entwickelte Prüfstand um eine elektromagnetische Abschirmung erweitert. Diese ist erforderlich, um die elektromagnetische Strahlung als Störgröße bei den Versuchen ausschließen zu können. Elektromagnetische Strahlung im Ofen resultiert aus den hohen Stromstärken in den Heizelementen, welche zum Erreichen der erforderlichen Temperaturen notwendig sind.

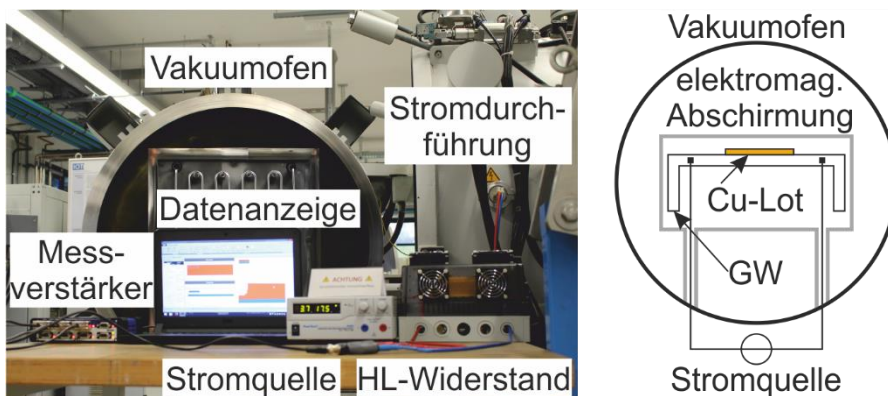


Abbildung 3: Experimenteller Versuchsstand für das stromunterstützte Löten

In Abbildung 4 sind die Ergebnisse der stromunterstützten Benetzungsversuche dargestellt. Ohne den Einfluss des elektrischen Stroms breitet sich das Cu-Lot in alle Richtungen gleichmäßig aus. Bei den Versuch mit der Stromstärke  $I = 30 \text{ A}$  folgt die Ausbreitung des Cu-Lots der Stromrichtung. Daher kann geschlossen werden, dass mithilfe elektrischen Stroms das Benetzungsverhalten beim Ofenlöten aktiv beeinflusst werden kann. Laut der Literatur wird dabei die Oberflächenspannung der Schmelze verringert, was u.a. zu einem besseren Benetzungswinkel oder Verstärkung des Kapillareffekts im Fall von Spaltfüllung führt.



Abbildung 4: Ergebnisse stromunterstützte Benetzung

### Zusammenfassung und Ausblick

Die geplanten Ziele für das Jahr 2018 wurden erfüllt. Im Rahmen des prozesstechnischen Ansatzes wurde der konventionelle Ofenlötprozess um die Komponente elektrischer Strom erweitert. Dadurch wurde eine neue Einflussgröße in den Prozess erfolgreich integriert. Diese erlaubt das gezielte Beeinflussen der Wechselwirkungen zwischen Lot und Grundwerkstoff und ermöglicht somit eine Kompensation von u.a. ungenügender Benetzung. Weiterhin wurden im Rahmen der werkstofftechnischen Kompensation Vorlegierungen hergestellt. Diese

wurden auf die thermische Eignung hin mittels DSC-Analysen sowie Gleichgewichtsberechnungen charakterisiert. Somit konnte eine potentiell geeignete Legierung identifiziert werden.

### **Veröffentlichungen**

K. Bobzin, M. Öte, S. Wiesner, A. Schmidt: Accelerated and Directed Diffusion during Electric Current-Assisted Brazing. In: Tagungsband zur International Brazing and Soldering Conference (IBSC), 2018, New Orleans, 15.-18.04.2018, S. 126-129, ISBN: 978-0-87171-939-3

A. Aretz, J. Mayer, K. Bobzin, M. Öte, S. Wiesner, A. Schmidt: In Situ investigation of production processes in a Large Chamber Scanning Electron Microscope. In: Ultramicroscopy, 04.07.2018. DOI: 10.1016/j.ultramic.2018.07.002  
Mitgewirkt in Kooperation mit TP A6 (GFE) und TP A1 (LLT)