

Lötbarkeitsprüfung (Löt)

1 Versuchsziel

Untersuchung der Lötbarkeit von Metallen, der Einfluß der Vorbehandlung und der Lötstoffe auf die Lötbarkeit sowie die Bewertung und Prüfung von Lötstellen.

2 Versuchsgrundlagen

2.1 Begriffe

Löten ist ein thermisches Verfahren zum stoffschlüssigen Fügen und Beschichten von Werkstoffen, wobei eine flüssige Phase durch Schmelzen eines Lotes (Schmelzlöten) oder durch Diffusion an den Grenzflächen (Diffusionslöten) entsteht. Die Schmelztemperatur des Lotes liegt unter der Solidustemperatur der Grundwerkstoffe, so daß diese ohne Aufschmelzen (im Gegensatz zum Schweißen) miteinander verbunden werden. Zur Herstellung einer Lötverbindung sind die Lötstoffe und eine Energiequelle erforderlich. Neben den Metallloten kommen auch Glaslote zur Anwendung. Diese dienen zur Verbindung von Glas- und Keramikteilen bzw. zur Herstellung einer Verbindung zwischen Metallteilen und diesen Werkstoffen.

Beim Weichlöten liegt die Arbeitstemperatur unterhalb von 450°C . Auf Grund der Benetzung der Werkstücke durch das Lot erfolgt eine mechanische Verklammerung der Werkstücke an den Lötflächen durch Adhäsionskräfte an den Phasengrenzen zwischen Lot und Werkstück. Das Weichlöten ist für Verbindungen geeignet, die keiner größeren mechanischen Belastung unterliegen.

Das Hartlöten erfolgt bei Arbeitstemperaturen oberhalb von 450°C . Durch die höhere Temperatur kommt es hier zu Diffusionsvorgängen. Das in den Grundwerkstoff eindiffundierende Lot bildet dort eine nachweisbare Legierungszone aus, die eine höhere mechanische Festigkeit der Lötstelle zur Folge hat.

Man versteht unter Lötbarkeit, die Eignung der Grundwerkstoffe sich mittels eines Lotes verbinden zu lassen und unter Lötfähigkeit, die Eignung von Lot und Flußmittel mit dem Grundwerkstoff eine Lötverbindung zu schaffen.

Das Löten hat gegenüber dem Schweißen und dem Kleben mit elektrisch leitenden Klebern folgende Vorteile:

- Überschußangebot an Lotwerkstoffen möglich (haftet nicht am Isolierwerkstoff),
- Variation bei den Abmessungen der Fügestellen,
- gute Lösbarkeit der Lötverbindungen (Recycling),
- einfache Ausrüstungen,
- Automatisierbarkeit.

Der Lötprozess kann nach verschiedenen Gesichtspunkten eingeteilt und kategorisiert werden, Tabelle 1 und 2:

Tabelle 1: Einteilung der Lötprozesse I

nach den Liquidustemperaturen der Lote	nach der Art der Lötstellen	nach der Art der Oxidbeseitigung	nach der Art der Lotzufuhr
<ul style="list-style-type: none"> • Weichlöten unter 450 °C • Hartlöten über 450 °C • Hochtemperaturlöten über 900 °C 	<ul style="list-style-type: none"> • Auftraglöten • Verbindungslöten • Spaltlöten • Fuglöten 	<ul style="list-style-type: none"> • mit Flußmitteln • unter reduzierendem Schutzgas • unter inertem Schutzgas • im Vakuum • mit Hilfe mechanische Verfahren 	<ul style="list-style-type: none"> • mit angesetztem Lot • mit an- oder eingelegtem Lot • mit Lotdepot • Tauchlöte • mit lotbeschichteten Teilen

Tabelle 2: Einteilung der Lötprozesse II

nach der Art der Lotzufuhr	nach Energieträgern	nach der Art der Fertigung
<ul style="list-style-type: none"> • mit angesetztem Lot • mit an- oder eingelegtem Lot • mit Lotdepot • Tauchlöte • mit lotbeschichteten Teilen 	<p>Weichlöten:</p> <ul style="list-style-type: none"> • ...durch feste Körper: Kolbenlöten; Blocklöten; Rollenlöten • ...durch Flüssigkeit: Lotbadlöten; Wellenlöten; Schleplöten; Ultraschalllöten; Wiederaufschmelzlöten • ...durch Gas: Flammlöten; Warmgaslöten; Löten im Gasofen • ...durch Strahl: Lichtstrahllöten • ...durch elektr. Strom: Induktionslöten an Luft; Widerstandslöten, Ofenlöten mit Flußmitteln <p>Hartlöten:</p> <ul style="list-style-type: none"> • ...durch Flüssigkeit: Lotbadlöten; Salzbadlöten • ...durch Gas: Flammlöten • ...durch elektrische Gasentladung: Lichtbogenlöten • ...durch Strahl: Lichtstrahllöten; Laserstrahllöten; Elektronenstrahllöten • ...durch elektrischen Strom: Induktionslöten an der Luft; Widerstandslöten; Ofenlöten mit Flußmittel <p>Hochtemperaturlöten:</p> <ul style="list-style-type: none"> • ...durch Strahl: Laserstrahllöten; Elektronenstrahllöten • ...durch elektr. Strom: Induktionslöten; Ofenlöten 	<ul style="list-style-type: none"> • Handlöten • Teilmechanisches Löten • Vollmechanisches Löten • Automatisches Löten

2.2 Lötstoffe

Lote sind Zusatzwerkstoffe, die in den meisten Fällen aus Legierungen aus zwei oder mehreren Metallen ohne oder mit weiteren Zusätzen bestehen. Sie dienen zur Herstellung der Lötverbindung und müssen dazu die zu verbindenden Werkstücke gut benetzen. Ihre Schmelztemperatur muß immer niedriger liegen, als die der zu verbindenden Werkstoffe.

Flußmittel sind nichtmetallische Stoffe (reine Substanzen oder Substanzgemische), die die Herstellung einer Lötverbindung erleichtern, indem sie störende Oxidschichten beseitigen bzw. deren Neubildung verhindern. Außerdem setzen sie die Oberflächenspannung herab und ermöglichen eine gute Benetzung der Grundstoffe. Die Flußmittelreste dürfen keinen Einfluß auf die Lötstelle ausüben bzw. müssen sich nach dem Löten leicht entfernen lassen.

Bindemittel ist ein Stoff mit dem pulverförmige Lote derart gebunden werden, daß sie als Paste an der Lötstelle angebracht oder zu Lötformteilen verarbeitet werden können.

Lötstopmittel ist ein Stoff, der ein unerwünschtes Ausbreiten von geschmolzenen Lot verhindert. Die Zusammensetzung und Bezeichnung der handelsüblichen Lote ist in den DIN-Vorschriften aufgeführt. Neben Hart- und Weichloten wird auch noch zwischen Loten für Schwer- und Leichtmetalle unterschieden. Es ist also nicht jedes Lot für jeden Grundwerkstoff geeignet.

Folgende Lotwerkstoffe finden vorrangig Einsatz

Weichlote für Schwermetalle: Legierungen und Zusätze der niedrig schmelzenden Schwermetalle Blei (Pb), Zinn (Sn), Wismut (Bi), Zink (Zn), Cadmium (Cd), Antimon (Sb). Am meisten verbreitet sind Zinnlote, wie z. B.:

Zinnlote	Bezeichnung	Gehalt in % an		
		Sn	Pb	Sb
Sb-haltige	z.B. LSn40Sb	39,5-40,5	Rest	0,50-2,0
Sb-arme	z.B. LSn40(Sb)	39,5-40,5	Rest	0,12-0,5
Sb-freie	z.B. LSn40	39,5-40,5	Rest	-

Bild 1 zeigt das Zustandsdiagramm des Systems Blei-Zinn, das die Basis für die zur Anwendung kommenden Zinnlote bildet. Man erkennt, daß je nach Zinngehalt die Legierung einen unterschiedlichen Schmelzbereich besitzt, der durch weitere Zusätze noch variiert werden kann. Die niedrigste Schmelztemperatur liegt in diesem System bei $183,3^{\circ}\text{C}$, der eutektischen Temperatur, und damit unterhalb der Schmelztemperaturen der reinen Metalle. Bei dieser Temperatur geht die eutektische Mischung mit einem Zinngehalt von 61,9 Masse% aus dem festen in den flüssigen Zustand über, das heißt diese Mischung verhält sich wie ein reines Metall und besitzt keinen Schmelzbereich. Die eutektische Legierung besitzt gute Festigkeitseigenschaften.

Weichlote für Leichtmetalle (Aluminium, Aluminiumlegierungen):

Probleme entstehen durch die erhöhte Korrosionsgefahr bei Schwermetallloten und die Oxidhaut beim Löten von Aluminium. Eingesetzt werden Lote auf Sn-Cd-Zn-Basis.

Hartlote:

Die gebräuchlichsten sind hier Lote auf Cu-Basis und die Ag-Lote. Für Aluminium und seine Legierungen eignen sich aluminiumreiche Lote z. B. LAlSi12

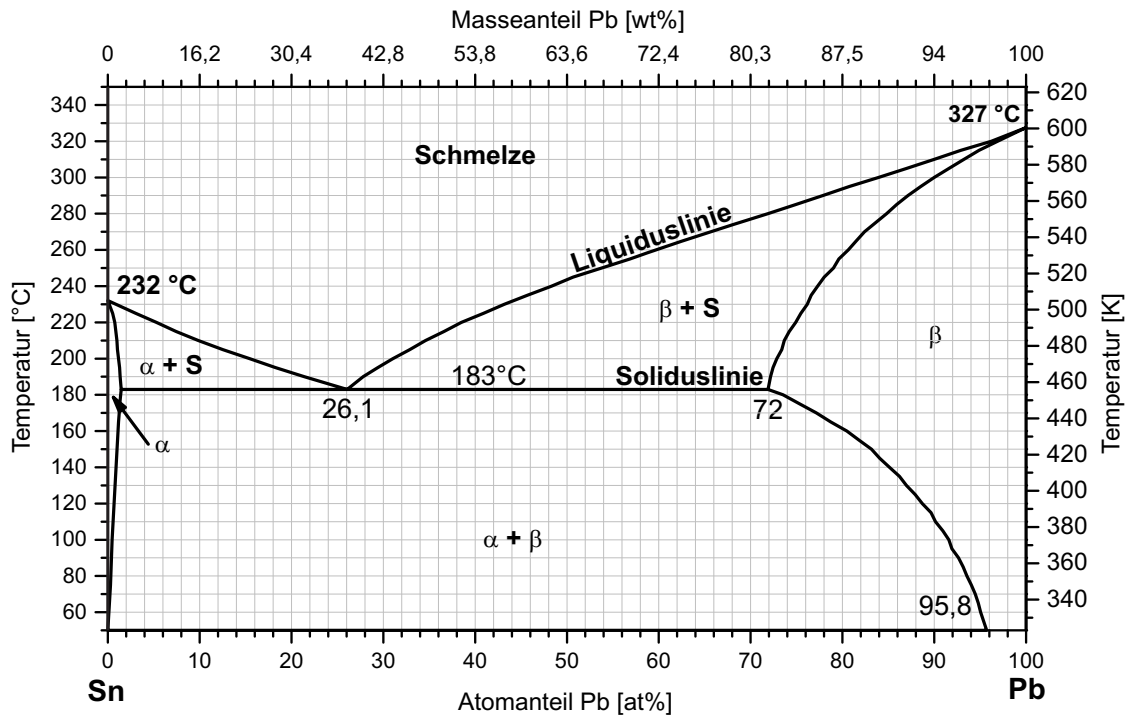


Bild 1: Zustandsdiagramm des binären Systems Blei-Zinn

2.3 Der Lötvorgang

Den Lötvorgang kann man vereinfacht in folgende Schritte unterteilen:

1. Vorbereiten der zu verbindenden Werkstücke
Hierzu gehört das Anpassen der Werkstücke und die Reinigung ihrer Oberfläche.
2. Aufbringen eines Flußmittels
Dabei wird die störende Oxidschicht beseitigt und durch Ausbildung einer Trennschicht zwischen Metall und Luft die erneute Oxidation verhindert.
3. Aufbringen des Lotes mit gleichzeitigem (bzw. vorherigem) Erwärmen der Lötstellen
Das schmelzende Lot benetzt die zu verbindenden Werkstoffe und stellt durch Verklammerung der Werkstoffe eine Verbindung her. Beim Hartlöten kommt es außerdem zur Diffusion des Lotes und einer Legierungsbildung.
4. Abkühlen und Nachbehandeln der Lötstelle
Zur Nachbehandlung gehört das Entfernen von Flußmittelresten und überschüssigem Lot, sowie eine eventuell erforderliche mechanische Bearbeitung der Lötstelle.

Je nach Art der zu verbindenden Werkstoffe, der späteren Funktion und Belastung der Lötstelle sowie der Stückzahl der zu lötenen Teile erfolgt die Auswahl der geeigneten Lote und Flußmittel und des zum Einsatz gelangenden Lötverfahrens.

Das Bild 2 zeigt die für den Lötvorgang charakteristische Temperaturen und Zeiten.

Schmelzbereich eines Lotes ist der Temperaturbereich vom Beginn des Schmelzes (Solidustemperatur) bis zur vollständigen Verflüssigung (Liquidustemperatur).

Arbeitstemperatur ist die niedrigste Oberflächentemperatur an der Lötstelle, bei der das Lot be-

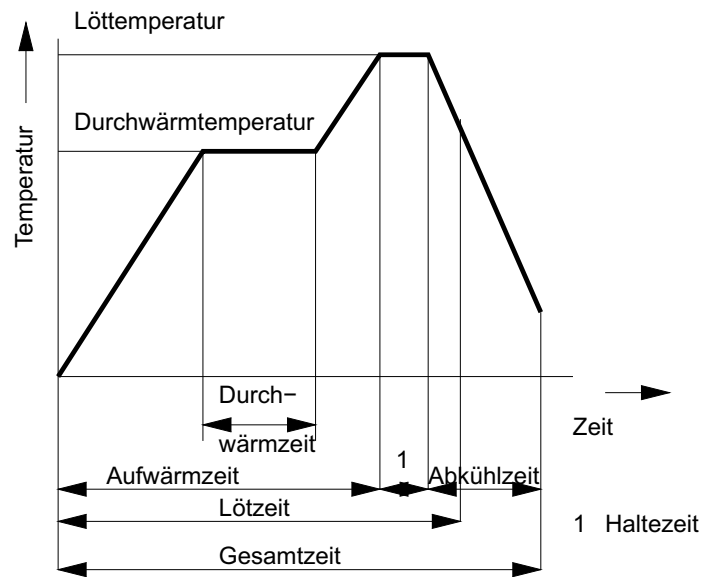


Bild 2: Für das Löten charakteristische Temperaturen und Zeiten

netzt oder sich durch Grenzflächendiffusion eine flüssige Phase bildet.

Löttemperatur ist die beim Löten an der Lötstelle herrschende Temperatur. Sie liegt oberhalb der Arbeitstemperatur.

Lötzeit ist die Zeitspanne vom Beginn des Aufwärmens des Lotes bis zur Erstarrung.

Haltezeit ist die Zeitspanne, in der die Lötstelle auf Löttemperatur gehalten wird.

2.4 Lötbarkeitsprüfung

Die Benetzung ist eine wesentliche Voraussetzung für das Löten und kann nur erfolgen, wenn das flüssige Lot in unmittelbarem Kontakt zum Grundwerkstoff kommt. Verunreinigungen und Oxidschichten verhindern die Benetzung. Ein Maß für die Benetzbarkeit von Oberflächen ist die Oberflächenspannung (Energie pro Fläche - J/m^2). Diese thermodynamische Größe entspricht der Arbeit, die notwendig ist, isotherm die Oberfläche einer Flüssigkeit (geschmolzenes Lot) zu vergrößern. Da jedes System danach strebt, die freie Energie zu minimieren, streben die Grenzflächen und freien Oberflächen danach, so klein wie möglich zu werden. Es entsteht eine Tropfenform.

Auf Grund des Kräftegleichgewichtes der drei zu berücksichtigenden Oberflächenenergien

- γ_l - Oberflächenenergie flüssig
- γ_s - Oberflächenenergie fest
- γ_{ls} - Oberflächenenergie an der Grenzfläche fest/flüssig
(Grenzflächenenergie)

verhalten die sich nach der Gleichung von Young, Gleichung 1:

$$\gamma_{ls} + \gamma_l \cos \Theta = \gamma_s \quad (1)$$

Durch die Messung des Randwinkels Θ (Benetzungswinkel) kann die Oberflächenspannung (bzw. -energie) bestimmt werden (Bild 3). Es gibt verschiedene Verfahren für die Prüfung der Lötbarkeit und der Einschätzung der Güte einer Lötverbindung.

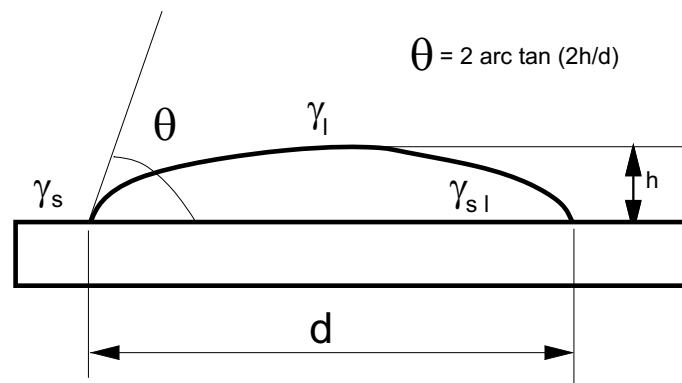


Bild 3: Bestimmung des Benetzungswinkels am liegenden Lottropfen

Benetzungsbestimmung

- Messung der Benetzungsgeschwindigkeit mittels Benetzungswaage, Tropfenmethode, Drehtauchtest, Meniskustest
- Messung des Endzustandes der Benetzung durch Flächenausbreitungstest, Lötkegeltest, Tauchtest

Bei den Lötbarkeitsprüfungen spielen qualitative (visuelle) Prüfungen immer noch eine große Rolle besonders bei den Tauchtests.

Fehler in Lötverbindungen sind Risse, Hohlräume, feste Einschlüsse, Bindefehler oder Formfehler. Zu Fehlern beim Lötverfahren rechnet man die Nichtbenetzung, Entnetzung, Brückenbildung, Löcher in Lötstellen, zustarke Lotaufbringung, Lötrückstände oder gestörte Lötstellen.

3 Vorbereitungsaufgaben

- Welche Gefügeeigenschaften ergeben sich aus dem Zustandsschaubild Sn-Pb?
- Welchen Zweck sollen Lötverbindungen erfüllen und welche Anforderungen werden an eine Lötverbindung gestellt?
- Erläutern Sie am Beispiel des Systems Blei-Zinn die Begriffe Arbeitstemperatur und Schmelzbereich!
- Warum sind je nach Werkstoffart unterschiedliche Flußmittel erforderlich?
- Worin bestehen die Unterschiede zwischen Löten und Schweißen?

4 Praktikumsaufgaben

Die Lötbarkeit ist mit Hilfe der Benetzungswinkelmessung, der visuellen Beurteilung und dem Festigkeitsverhalten in Abhängigkeit von Grundwerkstoff, Lötstoff und Vorbehandlungsmethode abzuschätzen.

- Vorbereitung:
Unterschiedliche Grundwerkstoffe sind durch mechanische Reinigung vorzubehandeln. Es werden gereinigte und ungereinigte Proben mit Lot bzw. mit Lot und Flußmittel vorbereitet.

2. Durchführung:

Die vorbereiteten Proben werden in den Muffelofen gebracht. Nach 20 bis 40 Sekunden (Verflüssigung und Ausbreitung des Lotes) sind die Proben wieder herauszunehmen. Nach dem Abkühlen werden die Proben begutachtet (Ausbreitungsfläche, Haftung des Lotes am Werkstoff) und untereinander verglichen.

3. Auswertung:

Alle Ergebnisse und Einschätzungen sind in das Protokoll einzutragen und zu diskutieren.

**Eine detaillierte Aufgabenstellung liegt am Versuchsplatz im
Meitnerbau, G.-Kirchhoff-Str. 5, Raum 3.2.310 aus!**

Hinweis: Bringen Sie zwecks Mitnahme der Messdaten einen USB-Stick zur Praktikumsdurchführung mit!

Literaturliste

- [1] MATTHES, K. J. ; RIEDEL, F.: *Fügetechnik*. 1. Auflage. Hanser Fachbuchverlag, 2003. – 324 S. – ISBN 978-3446221338
- [2] GUILLERY, P. ; HEZEL, R. ; REPPICH, B.: *Werkstoffkunde für die Elektrotechnik*. Friedr. Vieweg & Sohn, 1992
- [3] BAUER, C.-O.: *Handbuch der Verbindungstechnik*. Fachbuchverlag Leipzig, 1999. – 334 S. – ISBN 978-3446146099
- [4] KLEIN-WASSINK, R. J. ; MÖLLER, B. F.: *Weichlöten in der Elektronik*. 2. Auflage. Leuze, E G, 1991. – 760 S. – ISBN 978-3874800662
- [5] SCHAT, W. ; POMPE, W. ; WORCH, H.: *Werkstoffwissenschaft*. 10. Auflage. Weinheim : Wiley-VCH Verlag, 2011. – 578 S. – ISBN 978-3527323234
- [6] BECKERT, M. ; NEUMANN, A.: *Grundlagen der Schweißtechnik, Löten*. Verlag Technik Berlin, 1971
- [7] GRÜNWALD, F.: *Fertigungsverfahren in der Gerätetechnik*. Verlag Technik Berlin, 1985
- [8] *DIN-DVS-Taschenbuch 196/1 Schweißtechnik 5: Hartlöten Normen, Merkblätter* (2008)
- [9] *DIN-DVS-Taschenbuch 196/2 Schweißtechnik 12: Weichlöten, gedruckte Schaltungen Normen, Merkblätter* (2008)