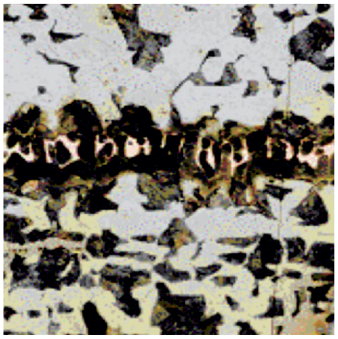
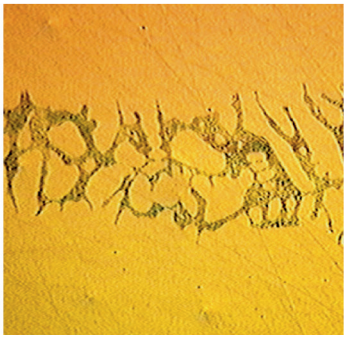
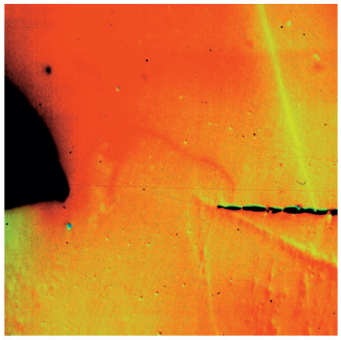
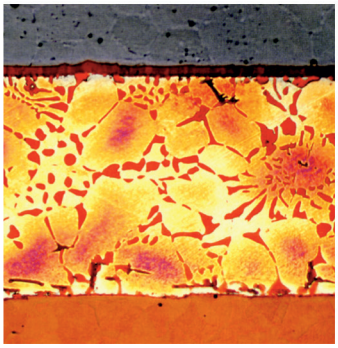
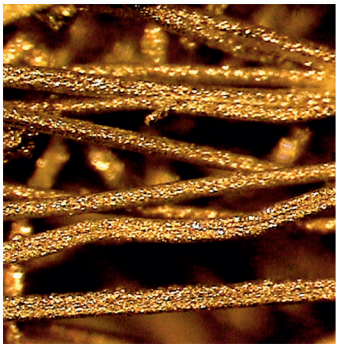
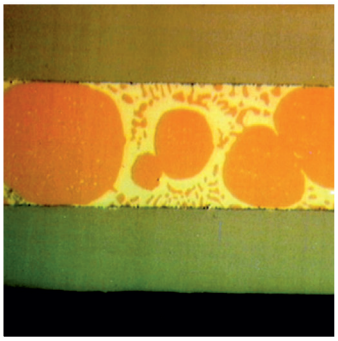
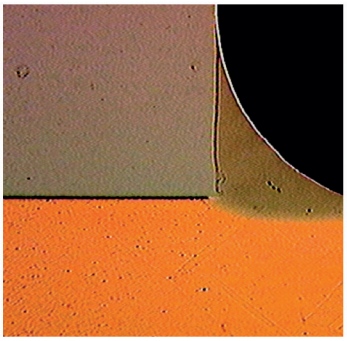
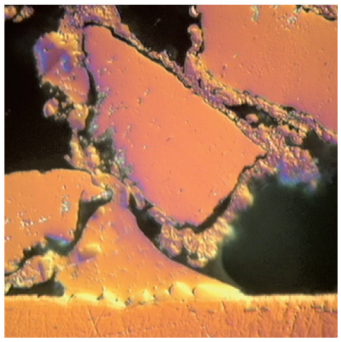
Klaus Wittke
Wolfgang Scheel

Handbuch Lötverbindungen

Inhaltsverzeichnis

mit Bildhinweisen (▶)

1 Grundlagen für die Fertigung von Lötverbindungen

1.1 Grundwerkstoffe für Lötbaugruppen

1.1.1 Grundwerkstoffarten

▶ Grundwerkstoffarten für Lötbaugruppen

1.1.2 Metallischer Grundwerkstoff

▶ Chemische Elemente – Vorkommen in der Erdkruste

▶ Kreislauf der Werkstoffe

▶ Metalle und Halbmetalle

▶ Periodensystem der Elemente – Metalle und Halbmetalle

1.1.2.1 Kompaktwerkstoff als metallischer Grundwerkstoff

▶ Co(Ni)-Schmelzlötverbindung – Gefüge im Schliff

1.1.2.2 Werkstoffverbund als metallischer Grundwerkstoff

▶ Werkstoffverbund mit heterogener Löt:Löt-Verbindung

▶ Leiterplatte als Werkstoffverbund mit elementarer Lötverbindung

1.1.2.3 Verbundwerkstoff als metallischer Grundwerkstoff

▶ Verbundwerkstoff mit heterogener Löt:Kleb-Verbindung

1.1.2.4 Schaumwerkstoff als metallischer Grundwerkstoff

▶ Schaumwerkstoff mit elementarer Schmelzlötverbindung

1.2 Festkörperoberflächen und äußere Festkörpergrenzflächen

1.2.1 Oberflächen des Festkörpers

▶ Tiefenbereiche verschiedener Prozesse auf den Oberflächen von Festkörpern

▶ Topologie einer realen Oberfläche

1.2.2 Grenzflächen des Festkörpers

▶ Vorbehandelte Grundwerkstoffgrenzflächen vor dem Löten und zum Löten aktivierte Grundwerkstoffoberflächen

1.2.3 Grenzflächen des Festkörpers vor dem Löten

▶ Aufbau technischer Oberflächen – Schema

▶ Rautiefe und Verformungstiefe nach der Bearbeitung von Stahl mit verschiedenen Schleif- und Poliermitteln

1.2.4.1 Fremdstoffbereich mit adsorbierten Staubteilchen
▶ Umweltbedingter Schwebstaub
▶ Sekundäre Staubpartikel als Reaktionsprodukte in Gasen
1.2.4.2 Fremdstoffbereich mit adsorbierten organischen Molekülen
1.2.4.3 Fremdstoffbereich mit adsorbierten Wassermolekülen
▶ Phasengrenze Metall-Flüssigkeit
1.2.4.4 Fremdstoffbereich mit adsorbierten Gasen
▶ Siliziumgrenzflächenrelief mit adsorbierten Gasmolekülen
1.2.5 Oberfläche des Festkörpers vor dem Löten
▶ Gestaltabweichungen nach DIN 4670
▶ Rautiefen bei unterschiedlichen Fertigungsverfahren
▶ Rautiefen für einen selbstständigen Stoffschluss
1.2.6 Werkstoffbereiche auf und unter der Festkörperoberfläche – Grundlagen
1.2.6.1 Werkstoffbereich mit Reaktionsgefüge auf der Oberfläche
▶ Zeit für die Bildung einer Sauerstoffmonolage in Abhängigkeit vom Umgebungsdruck
▶ Zusammensetzung des Reaktionsgefüges nach Teilefertigung
▶ Zusammensetzung des Reaktionsgefüges nach Teilefertigung und mechanischem Abrieb
1.2.6.2 Werkstoffbereich mit Verformungsgefüge unter der Oberfläche
▶ Bearbeitungsschicht an einem Kupfereinkristall mit erhöhter Versetzungsdichte
1.3 Homologe Temperaturen
1.3.1 Festigkeit von Metallen und homologe Temperatur
▶ Einfluss der Temperatur auf die Festigkeit von Metallen und Metallegierungen
1.3.2 Kriechwiderstand von Schmelzlötverbindungen und homologe Temperatur
▶ Zulässige Betriebstemperaturen für Schmelzlötverbindungen bei einer kritischen homologen Temperatur von 0,85
1.3.3 Aggregatzustände und homologe Temperatur
▶ Physikalische und technische Aggregatzustände
1.3.4 Fertigungsverfahren und homologe Temperatur
▶ Homologe Temperaturen – Bedeutung für die Löt-, Schweiß- und Fertigungstechnik
1.4 Fügen und Fügeverbindungen
1.4.1 Fügen
▶ Fügen – ein Fertigungshauptverfahren
1.4.2 Fügeverbindung
▶ Formschlussverbindung – punktförmige
▶ System der Fügeverbindungen

1.4.3 Fügeverbund
1.4.4 Formschlussverbindung
1.4.5 Kraftschlussverbindung
1.4.6 Stoffschlussverbindung
▶ Kontakte in Fügeanschlussflächen
2 Lötverbindungen in Lötbaugruppen
2.1 Lötverbindung als Stoffschlussverbindung
2.1.1 Stoffschlussverbindungen
▶ Stoffschlussverbindungen – mögliche Varianten
▶ Wandelverbindungen zwischen Diamant und Graphit
2.1.1.1 Lötverbindung als Stoffschlussverbindung
▶ Werkstoffspezifischer Aufbau der Stoffschlussverbindungen
2.1.1.2 Schweißverbindung als Stoffschlussverbindung
2.1.1.3 Klebverbindung als Stoffschlussverbindung
2.1.2 Chemische Bindungen in Stoffschlussverbindungen
▶ Bindungsarten und ihre Zwischenformen (Mischbindung) nach [1] und Zuordnung der Kleb-, Löt- und Schweißverbindungen
2.1.3 Wesen der Fertigung von Lötverbindungen
▶ Elementare mittelbare Lötverbindung als Werkstoffverbund mit zwei Phasen und zwei inneren Grenzflächen
2.1.4 Wirkprinzip der Stoffvereinigung beim Löten
2.1.5 System der Lötverbindungen
▶ Gattungen, Gruppen, Klassen, Arten, Typen und Untertypen von Lötverbindungen
2.1.6 Anzahl der für einen Werkstoff möglichen Stoffschlussverbindungen
▶ Anzahl der für einen Werkstoff prinzipiell möglichen Stoffschlussverbindungen
▶ Natürliche letal-vitale Klebverbindungen im Perlmutt
2.2 Metall-, Keramik- und Kunststoff-Stoffschlussverbindungen
2.2.1 Klebverbindungen – Lötverbindungen
2.2.1.1 Metall-Klebverbindung
▶ Metall-Klebverbindung – Metallrotor mit Metallwelle
2.2.1.2 Keramik-Klebverbindung
▶ Keramik-Klebverbindungen
2.2.1.3 Kunststoff-Klebverbindung
▶ Kunststoff-Klebverbindung
2.2.2 Lötverbindungen – Lötverbindungen
2.2.2.1 Metall-Lötverbindung
▶ Kupfer-Mikroreaktor mit Metall-Lötverbindungen

2.2.2.2 Keramik-Lötverbindung
▶ Oxidkeramische Grundwerkstoffe und Zusatzwerkstoffe
▶ Zusammensetzung einer Keramik-Lötverbindung
2.2.2.3 Kunststoff-Lötverbindung
▶ Manuelles Schmelzlöten von Kunststoff-Lötverbindungen
2.2.3 Schweißverbindungen – Lötverbindungen
2.2.3.1 Metall-Schweißverbindung
▶ Gefüge von Metall-Schmelzschweißverbindungen
2.2.3.2 Keramik-Schweißverbindung
▶ Keramik-Schweißverbindung und Keramik-Schweißbaugruppen
2.2.3.3 Kunststoff-Schweißverbindung
▶ Kunststoff-Schweißverbindung und Kunststoff-Schweißbauteil
2.3 Elementare Lötverbindung
▶ Elementare mittelbare Schmelzlötverbindung durch Laserschweißen und elementare unmittelbare Presslötverbindung durch Rührreibschweißen
2.3.1 Elementare Presslötverbindung
▶ Elementare mittelbare Titanpresslötverbindung durch Diffusionsschweißen und elementare unmittelbare Stahlpresslötverbindung durch Reibschweißen
2.3.1.1 Elementare unmittelbare Presslötverbindung und das Problem der Schweißbarkeit
▶ Verfahren zur Fertigung von Pressschweißverbindungen und Presslötverbindungen
▶ Ultraschallfügen von Presslötverbindungen und Pressschweißverbindungen
▶ Presslötverbindungen und Pressschweißverbindungen durch Bonden
2.3.1.2 Elementare mittelbare Presslötverbindung
▶ Mittelbare Presslötverbindungen durch Kaltpressschweißen
2.3.2 Elementare Schmelzlötverbindung
▶ Elementare mittelbare Schmelzlötverbindungen durch Ofenlöten und Flammlöten
2.3.2.1 Elementare unmittelbare Schmelzlötverbindung und das Problem des Auftragschweißens, Metallspritzens und Verbundgießens
▶ Gemischte unmittelbare Kupfer-Schmelzschweiß-/Stahl-Schmelzlöt-Verbindung und Aluminium-Schmelzschweiß-/Stahl-Schmelzlöt-Verbindung durch Schmelzschweißen
▶ Elementare unmittelbare Kupfer-Schmelzlöt-/Silber-Schmelzlöt-Verbindungen durch Schmelzlöten mit Reaktionslot
▶ Elementare unmittelbare Schmelzlötverbindung durch Auftragschweißen
▶ Elementare unmittelbare Schmelzlötverbindung durch Verbundgießen

2.3.2.2 Elementare mittelbare Schmelzlötverbindung und das Problem des Flüssigphasensinterns
▶ Elementare mittelbare Stahl(AgCu)Stahl-Schmelzlötverbindung und Cu(AgCu)Cu-Schmelzlötverbindung
▶ Elementare mittelbare Schmelzlötverbindungen durch Flüssigphasensintern
2.3.3 Elementare mittelbare Kondensationslötverbindung
▶ Elementare mittelbare Kondensationslötverbindungen durch galvanisches Abscheiden
2.4 Gemischte Lötverbindung
▶ Gemischte Al(ZnAl2)-Löt/Stahl(ZnAl2)-Schmelzlöt-Verbindung
2.4.1 Gemischte Löt/Löt-Verbindung
▶ Gemischte mittelbare Löt/Löt-Verbindungen durch Ofenlöten
2.4.2 Gemischte Löt/Schweiß-Verbindung
▶ Gemischte unmittelbare Löt/Schweiß-Verbindungen
2.4.3 Gemischte Löt/Kleb-Verbindung
▶ Gemischte unmittelbare Löt/Schweiß-Verbindungen
2.5 Heterogene Lötverbindung
▶ Verbundwerkstoffe – Einteilung und Anwendung
▶ Verbundwerkstoffe für Kühlkörper in Hochleistungselektronikbaugruppen
▶ Heterogene mittelbare Löt:Kleb-Verbindung durch Schmelzlöten von WC-Hartmetall mit einem CrNiMo-Stahl
2.5.1 Heterogene Löt:Löt-Verbindung
2.5.2 Heterogene Löt:Kleb-Verbindung
2.6 Kombinierte Lötverbindung
▶ Kombinierte Schmelzschweiß-Schmelzlöt-Verbindung
2.6.1 Kombinierte Löt-Stoffschluss-Verbindung
▶ Kombinierte Presslöt-Schmelzkleb-Verbindung durch Kleben mit Silberpartikeln gefülltem Epoxydharz
▶ Kombinierte Schmelzschweiß-Schmelzlöt-Verbindung
2.6.2 Kombinierte Löt-Kraftschluss-Verbindung
▶ Kombinierte Presslöt-Schrauben-Verbindung
▶ Kombinierte Presslöt-Querpress-Verbindung
2.6.3 Kombinierte Löt-Formschluss-Verbindung
▶ Kombinierte Schmelzlöt-Formschluss-Verbindung zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der Durchsetzfügeverbindung
▶ Kombinierte Schmelzlöt-Formschluss-Verbindung zur Verbesserung der Dauerfestigkeit der Lötverbindung
2.6.4 Kennzeichnung der elementaren, gemischten, heterogenen und kombinierten Lötverbindung in Arbeitsunterlagen
▶ Kennzeichnung elementarer, heterogener, gemischter und kombinierter Lötverbindungen in konstruktiven und technologischen Arbeitsunterlagen

2.7 Feste, viskose, flüssige und bewegliche Metall-Lötverbindungen
2.7.1 Feste Lötverbindung
▶ Aggregatzustände von Stoffen
▶ Aggregatzustände des Lötguts → Lötverbindungsgruppen
2.7.2 Viskose Lötverbindung
▶ Homologe Temperaturen und mechanische Eigenschaften von Metallen
▶ Aggregatzustände beim Löten → Lötverfahren und Lötverbindungstypen
2.7.3 Flüssige Lötverbindung
▶ Zyklen bis zum Bruch von Weichlötverbindungen
▶ Fest-flüssige kombinierte Löt-Löt-Verbindung
▶ Aluminiuminhibitor in Lotschmelzen zur Verringerung der Flüssig-Metall-Korrosion
▶ Flüssige Lötverbindungen in Steckverbindern
▶ Fest-flüssige kombinierte Löt-Kleb-Verbindung – elektrischer Widerstand
▶ Fest-flüssige kombinierte Löt-Kleb-Verbindung – Korngröße im Lötgut
2.7.4 Bewegliche Lötverbindung
▶ Fertigungsverfahren Füllen nach DIN 8593
▶ Flüssige Lote in Wärmetauschern und elektrischen Flüssig-Metall-Kontakten
3 Lötbaugruppen mit Lötverbindungen
3.1 Konstruktive Gestaltung
3.1.1 Konstruktive Aufbauvarianten
▶ Konstruktive Grundvarianten der Lötbaugruppen
▶ Geometrische Varianten der Lötbaugruppen
▶ Geometrische Varianten der Elektronikbaugruppen
3.1.2 Stoßarten der Lötverbindungen
▶ Stoßarten zwischen den Lötbauteilen
3.1.3 Montagespalt und Lötspalt
▶ Spaltbreitenänderung bei Erwärmung auf Löttemperatur
3.1.4 Lötflächenoptimierung zur Verbesserung der Verbindungswertigkeit
▶ Berechnung der Überlapp-Lötverbindungen [1] und das Problem der Einstecklötverbindungen
▶ Berechnung der Festigkeit von zug- oder druckbelasteten Bundbolzen-Platte-Lötverbindungen
▶ Festigkeit von Lötverbindungen – Einfluss von Lötfläche, Montagespalt, Bauteildicke, Überlapplänge und Löt-Zusatzwerkstoffen
3.2 Primat der Lötverbindung und Lötbarkeit
3.2.1 Primat der Lötverbindung
▶ Lichtbogen – multifunktionale Anwendung zur Fertigung von formschlüssigen, kraftschlüssigen und stoffschlüssigen Fügeverbindungen

3.2.2 Lötbarkeit
▶ Lötbarkeit als Gesamtheit von Lötmöglichkeit, Löteignung und Lötsicherheit
3.2.2.1 Lötmöglichkeit als Element der Lötbarkeit
▶ Energie- und Wärmequellen für die Fertigung von Lötverbindungen
3.2.2.2 Löteignung als Element der Lötbarkeit
▶ Lötverfahren – Bewertung anhand von Flexibilität und spezifischem Zeitaufwand
▶ Lötverfahren – Bewertung anhand lötbarer Stoßarten und Fertigungsart
3.2.2.3 Lötsicherheit als Element der Lötbarkeit
3.3 Qualität und Qualitätsabweichungen
3.3.1 Qualität der Lötverbindung
3.3.2 Qualitätsabweichungen in Lötverbindungen
▶ Fehler und Mängel – Qualitätsabweichungen in Lötverbindungen
▶ Qualitätsabweichungen – Einfluss auf die Systemeigenschaften von Lötverbindungen
3.3.3 Fehler und Mängel in Lötverbindungen
▶ Fehler und Mängel als Qualitätsabweichungen in Lötverbindungen
3.3.4 Fehler in Schmelzlötverbindungen
3.3.4.1 Risse in Schmelzlötverbindungen
▶ Rissarten in Schmelzlötverbindungen
3.3.4.1.1 Schrumpfungs- und Ausdehnungsrisse in Schmelzlötverbindungen
▶ Verformungsquellen beim Schmelzlöten mit globaler und lokaler Erwärmung
▶ Schrumpfungs- und Ausdehnungsrisse in Elektronikbaugruppen
3.3.4.1.2 Versprödungsrisse in Schmelzlötverbindungen
▶ 2. Temperaturintervall der Sprödigkeit als Ursache für Versprödungsrisse
3.3.4.1.3 Lamellenrisse in Schmelzlötverbindungen
▶ Innere metallurgische Kerben als Ursache für Lamellenrisse
3.3.4.1.4 Kaltrisse in Schmelzlötverbindungen
▶ Kaltrisse in Schmelzlötverbindungen und Schmelzschweißverbindungen
3.3.4.1.5 Untersolidusrisse in Schmelzlötverbindungen und das Problem der Lötbrüchigkeit
▶ Untersolidusrisse in Schmelzlötverbindungen
▶ Korngrenzenlötverbindungen neben der Schmelzlötverbindung
3.3.4.1.6 Warmrisse in Schmelzlötverbindungen
▶ Warmrisse in Schmelzlötverbindungen
3.3.4.2 Durchschmelzungen in Schmelzlötverbindungen
▶ Durchschmelzungen in Schmelzlötverbindungen

3.3.4.3 Einschlüsse in Schmelzlötverbindungen
- ▶ Einschlüsse in Schmelzlötverbindungen
- ▶ Entstehung von metastabilen Kristallisationskeimen in der Lötgutschmelze
- ▶ Antiblasen im Bier und Lottropfen im Schmelzlötgut

3.3.4.4 Poren und Blasen in Schmelzlötverbindungen
- ▶ Poren und Blasen in Schmelzlötverbindungen
- ▶ Wasserstofflöslichkeit in Metallen
- ▶ Blasen in Schmelzlötverbindungen

3.3.4.5 Lunker in Schmelzlötverbindungen
- ▶ Makrolunker und Mikrolunker
- ▶ Lunkerbildung durch Volumenschwund – Schema

3.3.4.6 Oberflächenbelegungen in Schmelzlötverbindungen
- ▶ Flussmittelrückstände in Lötbaugruppen mit verdeckten Schmelzlötverbindungen
- ▶ Metalldendriten und intermetallische Phasen als Oberflächenbelegungen

3.3.4.7 Falschbenetzungen in Schmelzlötverbindungen
- ▶ Unterbenetzung, Fehlbenetzung und Überbenetzung beim Schmelzlöten
- ▶ Lotzapfen, Lotspinnen und Lotperlen beim Schmelzlöten

3.3.4.8 Lageabweichungen in Schmelzlötverbindungen
- ▶ Lageabweichungen in Schmelzlötverbindungen von Elektronikbaugruppen
- ▶ Grabsteineffekt als Lageabweichung

3.3.4.9 Gestaltabweichungen in Schmelzlötverbindungen
- ▶ Gestaltabweichungen in Schmelzlötverbindungen

3.3.5 Verbindungswertigkeit zur Bewertung der Qualitä
- ▶ Zugfestigkeit von elementaren und kombinierten Stahl(Kupfer)-Schmelzlötverbindungen
- ▶ Verbindungswertigkeit und normierte Zugfestigkeit von Stahl(Kupfer)-Lötverbindungen
- ▶ Verbindungswertigkeit zur Bewertung der erreichten Lötbarkeit

3.3.6 Irdische Betriebsbedingungen

3.4 Eigenschaften der Lötverbindungen

3.4.1 Systemeigenschaften der Lötverbindung
- ▶ Systemeigenschaften der Lötverbindung und ihre möglichen Veränderungen bis zum Lebensdauerende – Schema ohne Diffusionszone und Mischkristallschicht
- ▶ Systemeigenschaften und Materialeigenschaften
- ▶ Kriechwiderstand des Löt-Zusatzwerkstoffs SnPb37 und einer Cu(SnPb37)-Schmelzlötverbindung
- ▶ Montagespalt und Zugfestigkeit von Stahl(Kupfer)-Schmelzlötverbindungen

3.4.2 Konstruktionseigenschaften der Lötverbindung
- ▶ Konstruktionseigenschaften der Lötverbindungen bzw. Lötauftragungen

3.4.3 Funktionseigenschaften der Lötverbindung
- ▶ Funktionseigenschaften der Lötverbindungen bzw. Lötauftragungen
- ▶ Konstruktionslote und Funktionslote für die Fertigung von mittelbaren Schmelzlötverbindungen
- ▶ Funktionslote – Beispiele

3.4.4 Gebrauchseigenschaften der Lötverbindung
- ▶ Gebrauchseigenschaften der Lötverbindungen bzw. Lötauftragungen
- ▶ Spezifische Zugfestigkeit (links) und spezifische Streckgrenze (rechts) von metallischen und nichtmetallischen Werkstoffen
- ▶ Spezifische Streckgrenze (rechts) von metallischen und nicht-metallischen Werkstoffen

3.4.5 Verbindungswertigkeit mit niedrigen Werten als prinzipieller Mangel der Lötverbindungen
- ▶ Niedrige Verbindungswertigkeit – prinzipieller Mangel der Lötverbindungen
- ▶ Verbindungswertigkeit von Stoffschlussverbindungen
- ▶ Verbindungswertigkeit von Aluminiumschweißverbindungen und Aluminiumlötverbindungen

3.4.6 Verbesserung der Verbindungswertigkeit durch höherwertige Löt-Zusatzwerkstoffe und Lötverfahren – 1. und 2. Gebot der Löttechnik

3.4.6.1 Höherfeste Fertiglote zur Verbesserung der Verbindungswertigkeit
- ▶ FeMn-Mischkristall-Fertiglote – Zusammensetzung
- ▶ FeMn-Mischkristall-Fertiglote – Eigenschaften
- ▶ FeMn-Fertiglote – Schmelzlöten von Rohrleitungen und Hochspannungsleitungen
- ▶ Palladiumfertiglote – Schmelzlöten von CrNi-Stählen

3.4.6.2 Verbundlote zur Verbesserung der Verbindungswertigkeit
- ▶ Nickellote (teilchenverstärkte) zum Schmelzlöten der gerichtet erstarrten warmfesten Ni-Superlegierung SchS26
- ▶ Zugfestigkeit und Gefüge der mit Nickel-Verbundloten gefertigten Lötverbindungen

3.4.6.3 Adaptive Schmelzlötverbindungen zur Verbesserung der Verbindungswertigkeit
- ▶ Umwandlung des Reaktions-Verbundlotes in das adaptive Verbundlötgut
- ▶ Adaptive Erhöhung des Kriechwiderstandes durch Anwendung von Verbundloten
- ▶ Adaptive Erhöhung der Auslöttemperatur durch Anwendung von Verbundloten

3.4.6.4 Adaptive Presslötverbindungen zur Verbesserung der Verbindungswertigkeit
- ▶ Wickelverbindungen mit lokalen adaptiven Presslötverbindungen
- ▶ Gefüge der lokalen adaptiven Presslötverbindungen in Wickelverbindungen

▶ Welle-Naben-Pressverbindungen mit lokalen adaptiven Presslötverbindungen
▶ Massearmer Drehmomentbegrenzer mit Welle-Naben-Pressverbindung und lokalen adaptiven Presslötverbindungen
3.4.6.5 Kombinierte Lötverbindungen zur Verbesserung der Verbindungswertigkeit
▶ Kombinierte stoffschlüssige Lötverbindungen
3.4.6.6 Übersoliduslöten zur Verbesserung der Verbindungswertigkeit
3.4.7 Verbesserung der Verbindungswertigkeit durch Oberflächen- und Volumendesign – 1. und 2. Gebot der Löttechnik
▶ Oberflächendesign und Volumendesign von Lötverbindungen
▶ Bruchverlauf in Hartmetall-Lötverbindungen und Elektroniklötbaugruppen mit 2D-Lötoberflächen
3.4.7.1 Oberflächendesign vor dem Löten zur Verbesserung der Verbindungswertigkeit
▶ Gemischte Aluminium-Löt-/Titan-Löt-Verbindung mit einer Oberflächenstrukturierung – Scherfestigkeit über Anzahl der Prüfzyklen
▶ Halbleiter-Lötbaugruppen mit einer berechneten Oberflächenstruktur
▶ Presslötverbindungen und Klebverbindungen mit negativen Formelementen zur Oberflächenstrukturierung
▶ Schmelzlötverbindung mit einseitiger Oberflächenprofilierung und Formschlussverbindung unter Nutzung beidseitiger Oberflächenstrukturierung
3.4.7.2 Oberflächendesign während des Schmelzlötens zur Verbesserung der Verbindungswertigkeit
▶ Oberflächenstrukturierung durch Pendeln der Wärmequelle während des Schmelzlötens
3.4.7.3 Volumendesign des Löt-Zusatzwerkstoffs vor dem Löten zur Verbesserung der Verbindungswertigkeit
3.4.7.4 Volumendesign des Lötgutes während des Schmelzlötens zur Verbesserung der Verbindungswertigkeit
▶ Volumenstrukturierung des Lötguts in-situ beim Schmelzlöten
▶ Kombinierte Stahl-Schweißlöt-Verbindungen erhöhter Verbindungswertigkeit
3.4.8 Verbesserung der Verbindungsfestigkeit durch Verfestigungsbehandlungen – 1. und 2. Gebot der Löttechnik
▶ Festigkeit über Versetzungsdichte
▶ Thermischer Lötzyklus mit thermischer Behandlung während des Lötens
▶ Mögliche Varianten der Verfestigung von Metallen – Schema für Stahl
3.4.8.1 Mechanische Behandlung des festen Grundwerkstoffs vor dem Löten zur Verfestigung der Lötverbindung
▶ Einfluss einer plastischen Verformung des Grundwerkstoffs vor dem Löten auf die Eigenschaften der Schmelzlötverbindungen
▶ Vererbung der Korngröße und der kristallographischen Orientierung des Grundwerkstoffs beim homoepitaxielen Erstarren der Schweißgutschmelze

▶ Vererbung der Korngröße und der kristallographischen Orientierung des Grundwerkstoffs beim heteroepitaxielen Erstarren der Lötgutschmelze
▶ Einfluss der Vorbehandlung auf die Festigkeit von Schmelzlötverbindungen
3.4.8.2 Thermo-chemische Behandlung des festen Grundwerkstoffs vor dem Löten zur Verfestigung der Lötverbindung
3.4.8.3 Thermische Behandlung des fest-flüssigen Lötverbundes beim Löten zur Verfestigung der Lötverbindung
▶ Überzeiten bei Löttemperatur und Kriechwiderstand von Kupfer-Schmelzlötverbindungen
▶ Überzeiten bei Löttemperatur und Scherfestigkeit von Stahl-Schmelzlötverbindungen
3.4.8.4 Thermo-chemische Behandlung des fest-flüssigen Lötverbundes beim Löten zur Verfestigung der Lötverbindung
▶ Kriechverhalten – Verbesserung durch Pikolegieren beim Schmelzlöten
▶ Pikolegieren beim Schmelzlöten
▶ Gefüge von mit Mangan pikolegierten Schmelzlötverbindungen
▶ Nickel-ODS-Legierung – Gefüge
▶ Innenoxidieren und Innennitridieren beim Schmelzlöten durch chemisch aktive Metalle in Niedrig-Temperatur-Zinn-Basisloten
▶ Abstehen von Metallschmelzen – Einfluss auf ihren Gasgehalt
3.4.8.5 Thermo-mechanische Behandlung des fest-flüssigen Lötverbundes beim Löten zur Verfestigung der Lötverbindung
▶ Verfestigung von Lötverbindungen durch Vibration beim Schmelzlöten
3.4.8.6 Thermische Behandlung der festen Lötverbindung beim Abkühlen zur Verfestigung der Lötverbindung
3.4.8.7 Thermische Behandlung, der festen Lötverbindung nach dem Löten mit Erwärmung über Raumtemperatur zur Verfestigung der Lötverbindung
▶ Verfestigung von Lötverbindungen durch thermische Behandlung nach dem Löten
3.4.8.8 Thermische Behandlung der festen Lötverbindung nach dem Löten bei Raumtemperatur zur Verfestigung der Lötverbindung
▶ Gleitmodul von Lötverbindungen – Veränderung durch die natürliche Wärmebehandlung (Auslagerung) bei Raumtemperatur nach Thermozyklen
▶ Kriechwiderstand von Lötverbindungen – Veränderung durch die natürliche Wärmebehandlung (Auslagerung) bei Raumtemperatur nach Thermozyklen
3.4.8.9 Mechanische Behandlung der festen Lötverbindung nach dem Löten bei Raumtemperatur zur Verfestigung der Lötverbindung
3.4.9 Sondereigenschaften der Lötverbindung – 1. und 2. Gebot der Löttechnik
3.4.9.1 Anisotropie der mechanischen Eigenschaften der Lötverbindung
▶ Anisotropie der Bruchenergie durch Gusstextur in Schmelzschweißnähten
▶ Anisotropie der mechanischen Eigenschaften durch Gusstextur in Schmelzschweißnähten

▶ Anisotropie der Festigkeit von Schmelzlötverbindungen an gerichtet erstarrten Turbinenschaufeln aus einer Nickelsuperlegierung

3.4.9.2 Anisotropie der Verschleißbeständigkeit der Lötauftragung

▶ Anisotropie der Verschleißbeständigkeit durch Gusstextur in Schmelzlötauftragungen

▶ Anisotropie der Verschleißbeständigkeit durch Gusstextur in Lötnähten

3.4.9.3 Auslöttemperatur der Lötverbindung

▶ Auslöttemperatur der Lötverbindung und Wiederaufschmelztemperatur des Lötgutes

▶ Thermisches Schmelzen der Korngrenzenphasen im eutektischen SnPb-Lot

▶ Bestimmung der systemspezifischen Auslöttemperatur nach GOST 21 547-76

▶ Erhöhung der Auslöttemperatur durch Anwendung eines (NiCrSiFeB)+(Ni;Co)-Reaktions-Verbundlotes mit Kobaltzusätzen zum Schmelzlöten von CrNi-Stahl

3.4.9.4 Wiederaufschmelztemperatur des Lötgutes der Lötverbindung

▶ Titanschmelzlöten mit einem temporär flüssigen NiTi-Reaktionslot

3.4.9.5 Kriechwiderstand der Lötverbindung

▶ Festigkeitsänderungen mit steigender homologer Temperatur

▶ Methode zur schnellen Prüfung des Kriechverhaltens von Lötverbindungen

▶ Kriechgeschwindigkeit – Einfluss von Spannungszyklen und Temperaturzyklen

▶ Kriechwiderstand von Lötverbindungen – Einfluss von Beschichtungen und Löt-Zusatzwerkstoffen

3.4.9.6 Schwerkraft – Einfluss auf die Eigenschaften der Lötverbindung

▶ Schwerkraft – Einfluss auf das Gefüge von gemischten Löt/Löt-Verbindungen und kombinierten Schmelzschweiß-Schmelzlöt-Verbindungen

▶ Schwerkraft – Einfluss auf das Gefüge und die Biegefestigkeit von gemischten Löt/Kleb-Verbindungen

▶ Schwerkraft-Potenzial-Probe

3.4.9.7 Schwerelosigkeit – Einfluss auf die Eigenschaften der Lötverbindung

▶ Schwerelosigkeit – Einfluss auf das thermische Schmelzen des Lotes beim Kolbenlöten

▶ Manuelles Elektronenstrahllöten im Weltall

3.4.9.8 Strahlung – Einfluss auf die Eigenschaften der Lötverbindung

▶ Strahlungsschädigungen beim Treffen von Neutronen mit Atomen des Kristallgitters von Metallen

▶ Schlagarbeit – Einfluss der Wärmebehandlung und des Neutronenflusses

▶ Lötbaugruppen für die Chemieindustrie, Luftfahrt und Atomtechnik – mechanische Eigenschaften der Lötverbindungen

▶ Gefüge der ZrNb(AlSi)ZrNb-Schmelzlötverbindungen von Hüllrohren der Brennelemente

▶ Schnellerstarrte Lote für den 1. Internationalen Versuchsreaktor ITER

3.4.9.9 Elektrische Felder – Einfluss auf die Eigenschaften der Lötverbindung
▶ Gefügeausbildung beim Schmelzlöten mit äußerer Spannungsquelle und Stromfluss und mit innerer Spannungsquelle ohne Stromfluss
▶ Haftfestigkeit von Kupfer-Schmelzlötverbindungen beim Ultraschalllöten mit einem SnPb-Fertiglot und mit Stromfluss
▶ Einfluss des Elektro-Masse-Transports auf Gefügeveränderungen bei Temperaturwechseln in mit einem SnBi-Basislot gefertigten Schmelzlötverbindungen
3.4.9.10 Magnetische Felder – Einfluss auf die Eigenschaften der Lötverbindung
▶ Breitspalt-Schmelzlöten mit einem Verbundlot und Magnetfeldwirkung
3.4.9.11 Betriebsdauer – Einfluss auf die Eigenschaften der Lötverbindung
▶ Mögliche Veränderungen der Qualität der Lötverbindungen bis zum Lebensdauerende
▶ Kriechgeschwindigkeit von Weichlötverbindungen – Veränderung bei thermo-mechanischen Wechselbeanspruchungen
▶ Ausfallraten über thermo-mechanische Zyklen in Schmelzlötverbindungen
4 Lötfertigung von Lötverbindungen
4.1 Fertigungselemente beim Löten
▶ Fertigungselemente bei der Fertigung von Lötverbindungen
4.1.1 Lötbaugruppe als Fertigungselement beim Löten
▶ Induktionslöten von Kurzschlussläufern
4.1.2 Lötprozess als Fertigungselement beim Löten
4.1.2.1 Lötverfahren als Element des Lötprozesses beim Löten
▶ Gemischte unmittelbare Presslötverbindung durch Rührreibschweißen
4.1.2.2 Lötmaterialien als Element des Lötprozesses beim Löten
▶ Schmelzlöten von Kupfer mit einem in-situ thermisch überhitzten SnAgCu-Kaskadenlot
4.1.2.3 Löt-Zusatzwerkstoffe als Element des Lötprozesses beim Löten
▶ Schmelzlöten von Kupfer mit einem in-situ thermisch überhitzten SnAgCu-Kaskadenlot
4.1.2.4 Löt-Beschichtungswerkstoffe als Element des Lötprozesses beim Löten
4.1.2.5 Löt-Hilfsstoffe als Element des Lötprozesses beim Löten
4.1.2.6 Löt-Füllstoffe als Element des Lötprozesses beim Löten
4.1.2.7 Lötparameter als Element des Lötprozesses beim Löten
4.1.3 Lötmittel als Fertigungselement beim Löten
▶ Lötprozess und Lötmittel zum Energie-, Stoff- und Informationstransport
4.1.3.1 Löteinrichtung als Element der Lötmittel beim Löten
4.1.3.2 Lötvorrichtung als Element der Lötmittel beim Löten
▶ Spezielle Lötvorrichtungen
4.1.3.3 Lötgerät als Element der Lötmittel beim Löten
4.1.4 Lötfachkraft als Fertigungselement beim Löten

4.2 Rationalisierung der Lötfertigung
4.2.1 Aufgaben der Rationalisierung
▶ Rationalisierung der Lötfertigung
4.2.2 Rationalisierungselemente
▶ Rationalisierungselemente und Fertigungselemente bei der Lötfertigung
4.2.3 Optimierung der Qualität und Qualitätsmenge – 1. und 2. Gebot
4.2.4 Humanisierung der Lötfertigung durch schädigungsarme Produkte und Fertigung – 3. Gebot
▶ Bewertungskriterien zur menschengerechten Arbeitsgestaltung im Rahmen produktiver und effizienter Arbeitsprozesse
4.2.5 Modernisierung der Lötfertigung – 4. bis 7. Gebot
4.2.5.1 Modernisierung durch massearme Produkte und Fertigung – 4. Gebot
▶ Modernisierung durch Anwendung massearmer Lötverfahren
4.2.5.2 Modernisierung der Lötfertigung durch stufenarme Produkte und Fertigung – 5. Gebot
4.2.5.3 Modernisierung durch energiearme Fertigung – 6. Gebot
▶ Baugruppenwirkungsgrad beim Ofenlöten und Tauchlöten
▶ Wärmedämmstoffe und effiziente Schutzgase zur Erhöhung des Einrichtungswirkungsgrades beim Schutzgas-Ofenlöten und Tauchlöten
▶ Baugruppenwirkungsgrad unterschiedlicher Lötverfahren
4.2.5.4 Modernisierung durch informationsarme Fertigung – 7. Gebot
▶ Information als Ergebnis der Wechselwirkungen zwischen Stoff und Energie im Lötprozess
▶ Modernisierung der Lötfertigung durch Anwendung vergegenständlichter Informationen
▶ Modernisierung der Lötfertigung durch Anwendung physikalisch-chemischer Grenzzustände
4.2.6. Intensivierung der Lötfertigung – 8. bis 9. Gebot
4.2.6.1 Intensivierung durch raumarme Fertigung – 8. Gebot
4.2.6.2 Intensivierung durch zeitarme Fertigung – 9. Gebot
4.2.7 Mechanisierung und Automatisierung durch bedienerarme Fertigung – 10. Gebot
▶ Einteilung der Lötverfahren nach Mechanisierungsgrad
▶ Rationalisierung der Lötfertigung durch Mechanisierung und Automatisierung
4.3 Löten mit verwandten Fertigungsverfahren
▶ Fertigungsverfahren nach DIN 8580
▶ Fertigungsverfahren – genormte und alternative
4.3.1 Urformen zur Fertigung von Lötverbindungen
▶ W-Verbundwerkstoffe und W-Werkstücke mit Schmelzlötkompaktierung
▶ Werkstoffverbunde mit Lötverbindungen durch Löten sowie durch Urformen mittels Sintern und Einschmelzen

▶ Presslötverbindungen durch Urformen mittels Sintern eines porösen Silberlotformteils
▶ Schmelzlötverbindungen durch Urformen mittels Gießen bzw. Infiltrieren
4.3.2 Volumenaufbauendes Fügen und Ergänzen zur Fertigung von Lötverbindungen
▶ Werkstoffverbunde mit unmittelbaren Schmelzlötverbindungen durch volumenaufbauendes Ergänzen mittels Chrom-Gußeisen auf unlegierten Stahl
▶ Werkstoffverbunde mit Schmelzlötverbindungen und Klebverbindungen durch Gießen
▶ Volumenaufbauendes Fügen und Ergänzen – Bauteilformen und Bauteileigenschaften
4.3.3 Umformen zur Fertigung von Lötverbindungen
▶ Aluminiumwerkstoffverbunde mit unmittelbaren Presslötverbindungen durch Warmumformen mittels Walzplattieren
▶ Stahlwerkstoffverbunde mit unmittelbaren Presslötverbindungen durch Warmumformen mittels Walzplattieren
4.3.4 Beschichten zur Fertigung von Lötverbindungen
▶ Schmelzlötauftragungen durch Beschichten mittels Tauchen
▶ Kondensationslötauftragungen durch Beschichten mittels chemischer Metallisierung
4.3.5 Stoffeigenschaftsändern zur Fertigung von Lötverbindungen
▶ Lötauftragungen durch Stoffeigenschaftsändern mittels Oberflächenauflegieren
▶ Kondensationslötauftragungen durch Beschichten mittels galvanischer Metallisierung
▶ Lötauftragungen durch Stoffeigenschaftsändern mittels Oberflächenauflegieren mit Bor
4.3.6 Schweißen zur Fertigung von Lötverbindungen
▶ Werkstoffkombinationen beim Diffusionslöten
▶ Werkstoffkombinationen für das Ultraschallschweißen
4.3.7 Kleben zur Fertigung von Lötverbindungen
▶ Prinzip des Infrarotlicht-Schweißens
5 Lötverfahren für die Fertigung von Lötverbindungen
5.1 Löten nach der Norm und dem Stand der Technik
5.1.1 Löten nach der Norm
5.1.2 Löten nach dem Stand der Technik vor der Norm
5.2 Lötverfahrenseinteilung
5.2.1 Merkmale zur Einteilung der Lötverfahren
▶ Merkmale für die Einteilung von Lötverfahren
5.2.2 Mechanisierungsgrad beim Löten

5.2.3 Flexibilität beim Löten
- ▶ Einteilung der Lötverfahren nach Flexibilität
- ▶ Bewertung der Lötverfahren anhand von Flexibilität und spezifischem Zeitaufwand

5.2.4 Fertigungsaufgabe beim Löten
- ▶ Einteilung der Lötverfahren nach Fertigungsaufgabe
- ▶ Energieart beim Löten
- ▶ Einteilung der Lötverfahren nach Energieart

5.2.6 Absolute Löttemperatur beim Löten
- ▶ Lötverfahren – Einteilung nach absoluter Liquidustemperatur der Lote – DIN 8505 (1979)
- ▶ Liquidustemperatur der Lote

5.2.7 Homologe Löttemperatur beim Löten
- ▶ Lötverfahren – Einteilung nach homologer Löttemperatur
- ▶ Niedrigtemperaturlöten, Hochtemperaturlöten, Untersoliduslöten und Übersoliduslöten
- ▶ Kritische Löttemperaturen bei der Fertigung von Metall-Schmelzlötverbindungen

5.2.8 Lötdruck beim Löten
- ▶ Lötverfahren – Einteilung nach Lötdruck
- ▶ Lötverfahren – Einteilung nach Lötdruck und Lötwärme

5.2.9 Löt-Hilfsstoff beim Löten
- ▶ Lötverfahren – Einteilung nach Löt-Hilfsstoffen

5.2.10 Lotdepot beim Löten
- ▶ Lötverfahren – Einteilung der Lötverfahren nach Lotdepot
- ▶ Löten mit internem Lotdepot und mit extern angebrachtem, eingebrachtem oder aufgebrachtem Lot

5.2.11 Aggregatzustand und Wirkprinzip beim Löten
- ▶ Lötverfahren – Einteilung nach Aggregatzustand beim Löten
- ▶ Chemisches, chemo-mechanisches, chemo-thermisches und chemo-mechano-thermisches Löten

5.2.12 Löt-Zusatzwerkstoff beim Löten
- ▶ Lötverfahren – Einteilung nach Löt-Zusatzwerkstoffen
- ▶ Fertig-, Reaktiv-, Reaktions und Kaskadenlote zum Press- und Schmelzlöten

5.2.13 Erstarrung der Lötgutschmelze beim Schmelzlöten
- ▶ Einteilung der Schmelzlötverfahren nach Erstarrung der Lötgutschmelze
- ▶ Schmelzlöten von Titan mit einem temporär flüssigen NiTi-Reaktionslot

5.2.14 Montagespalt beim Schmelzlöten
- ▶ Einteilung der Schmelzlötverfahren nach Montagespalt
- ▶ Fugenlöten – Spaltlöten – Breitspaltlöten – Engspaltlöten

6. Lötmaterialien für die Fertigung von Lötverbindungen
6.1 Löt-Zusatzwerkstoff
6.1.1 Lotwerkstoffe
▶ Lotwerkstoffe für die Fertigung von mittelbaren Schmelzlötverbindungen
6.1.2 Fertiglote
▶ Fertiglote für die Fertigung von mittelbaren Press- und Schmelzlötverbindungen
6.1.2.1 Intermetall-Fertiglote
▶ Intermetall-TiAl-Fertiglote für die Fertigung von mittelbaren Schmelzlötverbindungen
6.1.2.2 Metall-Fertiglote
▶ Schmelzlötverbindungen in Cu-, CuNi-, NiCu- und Ni-Grundwerkstoffen
▶ Artfremde Metall-Fertiglote für die Fertigung von mittelbaren Lötverbindungen
▶ Kupfer- und Nickel-Fertiglote zum Untersoliduslöten und Übersoliduslöten von mittelbaren Schmelzlötverbindungen in Cu-, CuNi-, NiCu- und Ni-Grundwerkstoffen
6.1.2.3 Mischkristall-Fertiglote
▶ Metall-Fertiglote, Mischkristall-Fertiglote und Eutektik-Fertiglote zum Untersoliduslöten von mittelbaren Press- und Schmelzlötverbindungen
6.1.2.4 Eutektik-Fertiglote
6.1.2.4 Eutektik-Fertiglote zum Untersoliduslöten von mittelbaren Press- und Schmelzlötverbindungen
6.1.3 Reaktivlote
▶ Reaktivlote für die Fertigung von mittelbaren Press- und Schmelzlötverbindungen
▶ AuMn-Mischkristall-Reaktivlot mit Schmelzpunktminimum – Herstellung und Anwendung
6.1.3.1 Reaktivlote mit thermischer Freisetzung des Metalls
▶ Silbernitrat als Reaktivlot zum Untersoliduslöten von mittelbaren Kupferschmelzlötverbindungen durch thermische Zersetzung
6.1.3.2 Reaktivlote mit Freisetzung des Metalls durch Redoxreaktionen
▶ Kupferoxide bzw. Kupfer- und Eisenoxide als Reaktivlote zum Untersoliduslöten von mittelbaren Stahlschmelzlötverbindungen durch Redoxreaktionen mit Wasserstoff
▶ Kupferoxide als Reaktivlote zum Untersoliduslöten von mittelbaren Stahlschmelzlötverbindungen durch Redoxreaktionen mit Wasserstoff
6.1.3.3 Reaktivlote mit Freisetzung des Metalls durch Austauschreaktionen
▶ Siliziumverbindungen als Reaktivlote in Flussmitteln zum Schmelzlöten von mittelbaren Aluminium-Schmelzlötverbindungen durch Austauschreaktionen
▶ Bismutverbindungen als Reaktivlotbäder zum Untersoliduslöten von mittelbaren Aluminium-Schmelzlötverbindungen durch Austauschreaktionen

6.1.3.4 Reaktivlote mit Freisetzung des Metalls durch elektrolytische Abscheidung
6.1.4 Reaktionslote
6.1.4.1 Reaktionslote – Einteilung nach Zusammensetzung
▶ Reaktionslote mit konstanter oder variabler chemischer Zusammensetzung für die Fertigung von unmittelbaren und mittelbaren Schmelzlötverbindungen
6.1.4.2 Reaktionslote – Einteilung nach Ausgangswerkstoffen
▶ AgCu-Reaktionslote aus Grund- und/oder Zusatzwerkstoffen für die Fertigung von unmittelbaren und mittelbaren Schmelzlötverbindungen
6.1.4.3 Reaktionslote – Einteilung nach Aggregatzustand
▶ Reaktionslote aus Lotkomponenten mit unterschiedlichen Aggregatzuständen für die Fertigung von unmittelbaren und mittelbaren Schmelzlötverbindungen
6.1.4.4 Viskos-feste Zusatzwerkstoff-Grundwerkstoff-Reaktionslote
▶ Viskos-festes CuSn-Reaktionslot zum Schmelzlöten von Kupfer-Lötbaugruppen bei 228 °C
6.1.4.5 Viskos-viskose Grundwerkstoff-Grundwerkstoff-BiSnCd-Reaktionslote
▶ BiSnCd-Eutektik-Reaktionslot zum Schmelzlöten von Zinn- mit BiCd40-Proben bei 104 °C
▶ Mikrohärte unmittelbarer Schmelzlötverbindungen mit viskos-viskosem Grundwerkstoff-Grundwerkstoff-BiSnCd-Eutektik-Reaktionslot mit und ohne Gleichstrom
▶ Korrosionsgeschwindigkeit und elektrische Leitfähigkeit unmittelbarer Schmelzlötverbindungen mit viskos-viskosem Grundwerkstoff-Grundwerkstoff-BiSnCd-Eutektik-Reaktionslot mit und ohne Gleichstrom
6.1.4.6 Viskos-viskose Grundwerkstoff-Zusatzwerkstoff-AlSi-Reaktionslote
▶ Viskos-viskoses AlSi-Eutektik-Reaktionslot zum Schmelzlöten von Aluminium-Lötbaugruppen bei 580 °C
▶ Schema des Schmelzlötens von Aluminium-Lötbaugruppen mit einem viskos-viskosem AlSi-Eutektik-Reaktionslot
6.1.4.7 Viskos-flüssige Grundwerkstoff-Zusatzwerkstoff-CuSnPb-Reaktionslote
▶ Viskos-flüssiges Grundwerkstoff-Zusatzwerkstoff-CuSnPb-Mischkristall-Reaktionslot zum Schmelzlöten von Kupfer-Lötbaugruppen bei 800 °C
▶ Zugfestigkeit von mittelbaren Kupfer- und Kupfer-Stahl-Lötverbindungen beim Schmelzlöten mit einem CuSnPb-Mischkristall-Reaktionslot
6.1.4.8 Viskos-dampfförmige Grundwerkstoff-Zusatzwerkstoff-CuMn-Reaktionslote
▶ Viskos-dampfförmiges Grundwerkstoff-Zusatzwerkstoff-CuMn-Mischkristall-Reaktionslot mit Schmelzpunktminimum zum Schmelzlöten von Kupfer bei 910 °C
▶ Gefüge von mittelbaren Kupfer- und Kupfer-Stahl-Schmelzlötverbindungen mit viskos-dampfförmigem Grundwerkstoff-Zusatzwerkstoff-CuMn-Mischkristallreaktionslot
▶ Fest-dampfförmige oder viskos-dampfförmige Grundwerkstoff-Zusatzwerkstoff-Reaktionslote

6.1.4.9 Fest-feste Grundwerkstoff-Reaktionslote

▶ Querschliff einer Laserschweißung von einem verzinnten Kupferverbinder auf einer Aluminiummetallisierung eines Siliziumwafers

▶ Gefüge einer unmittelbaren gemischten Löt/Löt-Verbindung durch fest-festes Mischkristall-Reaktionslot

6.1.4.10 Flüssig-feste Zusatzwerkstoff-Grundwerkstoff-Reaktionslote

▶ Gefüge mittelbarer elementarer Kupfer-Schmelzlötverbindungen mit flüssig-festen Zusatzwerkstoff-Grundwerkstoff-Reaktionloten

▶ Mechanische Eigenschaften mittelbarer gemischter Stahl(ZnAl)-Schmelzlöt/Al(ZnAl)-Schmelzlöt-Verbindungen mit flüssig-festen Zusatzwerkstoff-Grundwerkstoff-Reaktionloten

6.1.4.11 Flüssig-flüssige Zusatzwerkstoff-Reaktionslote zur Fertigung mittelbarer Schmelzlötverbindungen

▶ Lötvorrichtung zur Fertigung von flüssig-flüssigen Mischkristall-Reaktionsloten

▶ Verbesserung des systemspezifischen Kriechwiderstandes von Schmelzlötverbindungen durch Anwendung von flüssig-flüssigen Reaktionsloten

6.1.5. Kaskadenlote für mittelbare Schmelzlötverbindungen

▶ Metallische Lote zum Schmelzlöten – Einteilung nach Herstellung und metallurgischer Aktivität

6.1.5.1 Kaskadenlotbildung

▶ Auslöttemperatur von Kupfer-Schmelzlötverbindungen

▶ Bildung des ternären SnAgCu-Kaskadenlotes

6.1.5.2 Kaskadenlöten und Stufenlöten

▶ Kaskadenlöten und Stufenlöten

6.1.5.3 Kaskadenlote und Rissbildung

▶ Auslöttemperaturen von Cu(SnBi)- und Cu(SnAgCu)-Schmelzlöt-Verbindungen beim Schmelzlöten auf Kupferleiterbahnen mit bleihaltigen Beschichtungen

▶ Bildung des ternären Bi52Pb32Sn16-Kaskadenlotes

▶ Warmrisse in Schmelzlötverbindungen durch Bildung von Kaskadenloten (fillet lifting)

6.1.5.4 Kaskadenlote und Lötbarkeit

▶ Benetzung von Titan mit AlSi- und Aluminium-Fertigloten beim Vakuum-Schmelzlöten ohne und mit Bleidämpfen

▶ Bildung des ternären ZnAgCu-Kaskadenlotes

▶ Fließen des SnAgAu-Kaskadenlotes in lange Lötspalte bei 240 °C / 2 min

6.1.5.5 Kaskadenlote und Lotentwicklung

▶ Bildung des ternären AgAlCu-Kaskadenlotes

▶ Erschmelzen des ternären AgAlCu-Kaskadenlotes aus AgCu- und Aluminiumkomponenten

▶ Schmelztemperaturen des ternären AgAlCu-Kaskadenlotes – berechnete, experimentelle und Literaturwerte
▶ Schmelztemperaturen des ternären AgAlGe-Kaskadenlotes – berechnete und Literaturwerte
6.1.6. Kompaktlote
▶ Kompaktlote – Verbundlote – Lotverbunde
6.1.6.1 Arteigene Kompaktlote
6.1.6.2 Artfremde Kompaktlote
6.1.7. Verbundlote
6.1.7.1 Schicht-Verbundlote
▶ Verbundlote zur Fertigung von mittelbaren Lötverbindungen mit Verbundlötgut
▶ Schicht-Verbundlot zum Hartmetalllöten
▶ Mehrschicht-Verbundlot zur Fertigung von gemischten Löt/Kleb-Verbindungen in Stahl-Keramik-Baugruppen
▶ Stähle mit Plattierungen – auch mit Lotplattierungen
6.1.7.2 Teilchen-Verbundlote
▶ Teilchen-Verbund-Fertiglot bzw. Teilchen-Verbund-Reaktionslot zur Fertigung von dispersionsverfestigten mittelbaren Schmelzlötverbindungen
▶ Verfestigung von mittelbaren Schmelzlötverbindungen durch Teilchen-Verbund-Fertiglote als Pulvergemisch
6.1.7.3 Faser-Verbundlote
▶ Faser-Verbund-Reaktionslote aus beschichteten Cu-, CuZn- und Aluminiumfasern
▶ Faser-Verbund-Fertiglot zur Fertigung von mittelbaren Breitspalt-Schmelzlötverbindungen durch Anwendung von Magnetfeldern
6.1.7.4 Struktur-Verbundlote
▶ Struktur-Verbundrohlinge aus handelsüblichen Halbzeugen und Produkten
▶ Struktur-Verbund-Fertiglot zur Fertigung von mittelbaren Schmelzlötverbindungen
▶ Struktur-Verbund-Fertiglot aus handelsüblichem Kupferschaum und Gefüge der Lötauftragungen
6.1.8 Lotverbunde
6.1.8.1 Aktivierungslotverbunde
▶ Lot-Flussmittelverbunde
6.1.8.2 Reaktionslotverbunde
▶ Lotverbund zur Fertigung von mittelbaren Schmelzlötverbindungen
▶ Lotverbund und Verbundlot zur Fertigung von mittelbaren Schmelzlötverbindungen
6.1.9 Lote – Einteilung nach Fertigungsaufgabe

6.1.9.1 Konstruktionslote
- ▶ CuP-Konstruktionslote als Ersatz für Silber-Konstruktionslote
- ▶ Konstruktionslote bei Raumtemperatur

6.1.9.2 Funktionslote
- ▶ Funktionslote bei Raumtemperatur
- ▶ Relative Kosten für die bleifreien Zinn-Funktionslote als Ersatz für das eutektische SnPb-Funktionslote – Zinn-Basislote
- ▶ Bleifreie Zinn-Funktionslote als Ersatz für eutektisches SnPb-Funktionslot

6.1.9.3 Gebrauchslote
- ▶ Dentallegierungen und Gebrauchslote vorgegebener Farbe
- ▶ Gusseiserne Säule (Wasserkran) – 1931

6.2 Löt-Füllstoffe
- ▶ Löt-Füllstoff für die Fertigung von Lötverbindungen mit Verbundlötgut
- ▶ Vormontage des Löt-Füllstoffs für die Fertigung von Lötverbindungen mit Verbundlötgut
- ▶ Dauerfestigkeit von Schmelzlötverbindungen und Schmelzschweiß-verbindungen – Einfluss der Löthohlkehlen

6.2.1 Füllelementformen
- ▶ Füllelemente und Verbundlötgut – Zuordnung zu den Verbundwerkstoffen

6.2.2 Füllelementwerkstoffe
- ▶ Teilchen-Verbundlötgut durch beschichtete und unbeschichtete metallische Füllelemente
- ▶ Teilchen-Verbundlötgut – Karbide als nichtmetallische Füllelemente
- ▶ Lötverbindung mit Teilchen-Verbundlötgut

6.2.3 Füllelementfunktionen

6.3 Löt-Beschichtungsstoffe
- ▶ Funktionsschichten durch Löt-Beschichtungsstoffe

6.3.1 Benetzungsschichten
- ▶ Lötanschlusswerkstoffe und Beschichtungen von THT-Bauteilanschlüssen
- ▶ Grundwerkstoffe mit ex-situ aufgebrachten Benetzungsschichten

6.3.2 Konservierungsschichten
- ▶ Flussmittel für die ex-situ Konservierung von SnPb-Benetzungsschichten auf Kupfer-Lötbaugruppen für 1 Jahr Lagerdauer
- ▶ Konservierung von SnPb-Benetzungsschichten auf Kupfer-Lötbaugruppen für 1 Jahr Lagerdauer
- ▶ Funktionsschichten auf Lötbauteilen von Elektronikbaugruppen

6.3.3 Lotstoppschichten
- ▶ Lotstoppschichten für die Fertigung von Elektroniklötbaugruppen
- ▶ Lotstoppkerben für die Fertigung von Lötverbindungen

6.3.4 Barriereschichten
- ▶ Diffusionsporen oder Kirkendall-Poren in der Diffusionszone des verfahrensbeeinflussten Grundwerkstoffs von Schmelzlötverbindungen
- ▶ Intermetallische Phasen im Lötgut von Schmelzlötverbindungen
- ▶ Chemisches Anschmelzen des Kupfer-Trägerwerkstoffs durch Fehler in den Nickel-Barriereschichten von Kupfer-Schmelzlötverbindungen
- ▶ Schmelzlöten von Stahl/Sinterstahl-Lötverbindungen mit in-situ Bildung von Barriereschichten

6.4 Löt-Hilfsstoff
- ▶ Oberflächenaktivierung des Grundwerkstoffs bzw. der Barriereschicht bei der Fertigung von Lötverbindungen – 6.4
- ▶ Verfahren zur Aktivierung und Konservierung der Oberflächen von Grundwerkstoffen, Barriereschichten und Löt-Zusatzwerkstoffen – 6.4
- ▶ Löt-Hilfsstoffe – Elemente für die Fertigung von Lötverbindungen – 6.4

6.4.1 Oberflächenaktivierung bei Raumtemperatur durch chemisches Potenzial
- ▶ Chemische Oberflächenaktivierung in bei Raumtemperatur flüssigen Fertigloten
- ▶ Ga- und Bi-Lote – bei Raumtemperatur (< 30 °C) flüssige Lote
- ▶ Eigenschaften von Ga und anderen Elementen mit Dichteanomalie sowie von Quecksilber
- ▶ Spontane Benetzung in chemischen Kontakten durch Dichteanomalie
- ▶ Bildung von niedrigschmelzende eutektischen Galliumkaskadenloten
- ▶ Versprödung von Aluminium durch Galliumsegregation in die Korngrenzen

6.4.1.1 Flussmittelfreies Schmelzlöten bei Raumtemperatur mit Fertigloten und chemischer Oberflächenaktivierung

6.4.1.2 Flussmittelfreies Schmelzlöten bei Raumtemperatur mit Reaktions-Verbundloten und chemischer Oberflächenaktivierung
- ▶ Flussmittelfreies Schmelzlöten von Lötbaugruppen bei Raumtemperatur mit fest-flüssigen Reaktions-Verbundloten
- ▶ Gallium- und Bismut-Reaktions-Verbundlote und Systemeigenschaften der Kupfer-Schmelzlötverbindungen mit Verbundlötgut

6.4.2 Oberflächenaktivierung bei Raumtemperatur durch mechanische Arbeit
- ▶ Mechanische Oberflächenaktivierung bei Normaldruck in flüssigen Fertigloten
- ▶ AlZn-Reiblot zum manuellen und maschinellen Vorbeloten von Aluminiumwerkstoffen
- ▶ Kollaps einer laserinduzierten Blase
- ▶ Ultraschall-Presslötverbindung und Ultraschall-Schmelzlötverbindung
- ▶ Spreng-Presslötverbindung und Spreng-Schmelzlötverbindungen

6.4.2.1 Flussmittelfreies Schmelzlöten bei Raumtemperatur mit Fertigloten und mechanischer Oberflächenaktivierung durch Schleifen
- ▶ Flussmittelfreies Schmelzlöten von Lötbaugruppen bei Raumtemperatur mit flüssigen Fertigloten...

6.4.2.2 Flussmittelfreies Schmelzlöten bei Raumtemperatur mit Fertigloten und mechanischer Oberflächenaktivierung durch Kavitation

- ▶ Flussmittelfreies Schmelzlöten von Lötbaugruppen bei Raumtemperatur mit flüssigen Fertigloten...

6.4.2.3 Flussmittelfreies Schmelzlöten bei Raumtemperatur mit Fertigloten und mechanischer Oberflächenaktivierung durch Lötdruck

- ▶ Flussmittelfreies Schmelzlöten von Lötbaugruppen bei Raumtemperatur mit flüssigen Fertigloten...

6.4.3. Oberflächenaktivierung bei Normaldruck oder Unterdruck durch thermische Energie

- ▶ Thermische Oberflächenaktivierung bei Normaldruck und Unterdruck
- ▶ Affinität der Metalle zu Sauerstoff
- ▶ Verhältnis der thermischen Ausdehnung der Metalloxide zur thermischen Ausdehnung der Metalle
- ▶ Differenz zwischen Verdampfungstemperaturen der Metalle im Feinvakuum und Schmelztemperaturen der Metalle bei Normaldruck
- ▶ Zersetzungstemperaturen von Metalloxiden bei Erwärmung an Luft
- ▶ Einfluss der Temperatur und der Dissoziationsspannung auf die Oxidation und Dissoziation von Metallen beim flussmittelfreien Schmelzlöten
- ▶ Verdampfungstemperaturen von Metalloxiden bei Erwärmung im Feinvakuum
- ▶ Vakuum – Einordnung anhand der Druckbereiche
- ▶ Dampfdruck von Metallen und Zusammenhang zwischen dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten und der Schmelztemperatur
- ▶ Innenoxidation unter der Oxidschicht der warmfesten TiAlNb-Legierung

6.4.3.1 Flussmittelfreies Tauchlöten in Lotbädern bei Normaldruck und thermischer Oberflächenaktivierung

- ▶ Flussmittelfreies Schmelzlöten von Lötbaugruppen bei Normaldruck in einem Fertiglotbad (Lotbadlöten) ...

6.4.3.2 Flussmittelfreies Tauchlöten in Ölbädern bei Normaldruck und thermischer Oberflächenaktivierung

- ▶ Flussmittelfreies Schmelzlöten von beloteten Lötbaugruppen bei Normaldruck in einem Ölbad (Ölbadlöten, Glycerinbadlöten)
- ▶ Lötauftragung mittels Umschmelzen von galvanisch erzeugten SnAgCu-Lotbumps durch Tauchlöten im Glycerinbad

6.4.3.3 Flussmittelfreies Tauchlöten in Salzbädern bei Normaldruck und thermischer Oberflächenaktivierung

- ▶ Flussmittelfreies Schmelzlöten von beloteten Lötbaugruppen bei Normaldruck in einem Salzbad (Salzbadlöten)
- ▶ Salzbäder – Zusammensetzung und Badtemperaturen
- ▶ Schutzgas- oder Vakuum-Löten mit thermischer Oberflächenaktivierung in Löt-Containern unter Nutzung von Salzbädern

6.4.3.4 Flussmittelfreies Tauchlöten in Dampfbädern bei Normaldruck und thermischer Oberflächenaktivierung

- ▶ Flussmittelfreies Schmelzlöten von beloteten Lötbaugruppen bei Normaldruck in einem Dampfbad (Dampfphasenlöten, Kondensationslöten, VP-Löten...)
- ▶ Die Prinzipielle Entwicklung der Reflow-Technologien
- ▶ Flussmittelfreies Schmelzlöten mit fest-festen Reaktionsloten im Dampfbad Schmelzlöten mit fest-festen Reaktionsloten im Dampfbad

6.4.3.5 Flussmittelfreies Schutzgaslöten in chemisch neutralen Gasen bei Normaldruck und thermischer Oberflächenaktivierung

- ▶ Flussmittelfreies Schmelzlöten von beloteten Lötbaugruppen bei Normaldruck im neutralen Schutzgas (Schutzgaslöten, Inertgaslöten)...
- ▶ Chemisch neutrale Schutzgase zum flussmittelfreien Schmelzlöten

6.4.3.6 Flussmittelfreies Vakuum-Löten in Luft oder Schutzgasen bei Unterdruck und thermischer Oberflächenaktivierung

- ▶ Flussmittelfreies Schmelzlöten von beloteten Lötbaugruppen bei Unterdruck im neutralen Vakuum (Vakuum-Löten) ...
- ▶ Löt-Container zum Schutzgaslöten und Vakuum-Löten
- ▶ Ausbreitungsflächen und Scherfestigkeit beim Vakuum-Schmelzlöten

6.4.3.7 Flussmittelfreies Autovakuum-Löten in Luft bei Unterdruck und thermischer Oberflächenaktivierung

- ▶ Flussmittelfreies Schmelzlöten von beloteten Lötbaugruppen bei Unterdruck im neutralen Vakuum (Autovakuum-Löten) ...
- ▶ Autovakuum-Schmelzlöten – Verfahrensschema und Lötbaugruppe

6.4.4 Oberflächenaktivierung bei Normaldruck oder Unterdruck durch chemisches Potenzial und thermische Energie

- ▶ Thermo-chemische Oberflächenaktivierung bei Normaldruck oder Unterdruck ...
- ▶ Wirkbereiche von Flussmittelschmelzen – Schema

6.4.4.1 Tauchlöten in Lotbädern bei Normaldruck und chemo-thermischer Oberflächenaktivierung

- ▶ Lotbad-Tauchlöten (Tauchlöten / Schwallloten / Wellenlöten / Schlepplöten / Rollenlöten / Hub-Tauch-Löten u. a.) von gefluxten Lötbaugruppen ...
- ▶ Lotbad-Tauchlöten – Verfahrensvarianten
- ▶ Hartmetall-Bohrkronen – Flussmittel-Schmelzlöten durch Lotbad-Tauchlöten

6.4.4.2 Tauchlöten in Ölbädern bei Normaldruck und chemo-thermischer Oberflächenaktivierung

- ▶ Ölbad-Tauchlöten (Tauchlöten) von gefluxten und beloteten Lötbaugruppen ...

6.4.4.3 Tauchlöten in Flussmittelbädern bei Normaldruck und chemo-thermischer Oberflächenaktivierung
- ▶ Flussmittelbad-Tauchlöten (Tauchlöten) von beloteten Lötbaugruppen ...
- ▶ Salze und Salzgemische für das Salzbadlöten oder Flussmittelbadlöten für Badtemperaturen von 485 °C bis 1300 °C
- ▶ Transportvorrichtung für das Durchlauf-Tauchlöten von Fahrradrahmen in Flussmittelbädern
- ▶ Salzgemische für das Flussmittel-Salzbadlöten von Aluminium-Lötbaugruppen für Badtemperaturen von 380 °C bis 638 °C

6.4.4.4 Tauchlöten in Dampfbädern bei Normaldruck und chemo-thermischer Oberflächenaktivierung
- ▶ Dampfbad-Tauchlöten (Tauchlöten) von beloteten und gefluxten Lötbaugruppen ...
- ▶ Dampfbad-Tauchlöten – Schema
- ▶ Zeitarmes Dampfbad-Tauchlöten

6.4.4.5 Schutzgaslöten in Flussmitteldämpfen bei Normaldruck und chemo-thermischer Oberflächenaktivierung
- ▶ Schutzgaslöten (Löten in aktivierten Schutzgasen, Löten im aktivierten Wasserdampf, Gasflux-Löten ...) von beloteten Lötbaugruppen in Flussmitteldämpfen...
- ▶ Chemische Verbindungen für das Schutzgaslöten in Flussmitteldämpfen
- ▶ Flammlöten mit Flussmitteldämpfen
- ▶ Wärmeübergang und Benetzungseigenschaften des mit Adipinsäure aktivierten Wasserdampfs
- ▶ Lötverbindungen durch Schmelzlöten im aktiviertem Wasserdampf

6.4.4.6 Schutzgaslöten in neutralen Gasen bei Normaldruck und chemo-thermischer Oberflächenaktivierung
- ▶ Schutzgaslöten in chemisch neutralen Schutzgasen (Schutzgaslöten, Stickstofflöten, Containerlöten, Warmgaslöten ...) von beloteten und gefluxten Lötbaugruppen ...
- ▶ Neutrale Schutzgase zum Flussmittel-Schmelzlöten
- ▶ Stickstoff – Eigenschaften und Reinheit
- ▶ Löteinrichtungen zum Erwärmen durch erhitzte Gase oder Dämpfe
- ▶ Mindesttemperaturen beim Schutzgaslöten für die thermische Oberflächenaktivierung durch die Fehlanpassung der Ausdehnung der Metalle und ihrer Oxide

6.4.4.7 Schutzgaslöten in reduzierenden Gasen bei Normaldruck und chemo-thermischer Oberflächenaktivierung
- ▶ Schutzgaslöten in reduzierenden Schutzgasen (Schutzgaslöten, Löten in kontrollierter Atmosphäre ...) von beloteten Lötbaugruppen ...
- ▶ Reduzierende Schutzgase – Zusammensetzung und Taupunkt
- ▶ Verfahren zum Aufbringen von Lotmaterial auf Montageteile für die Halbleitermontage

6.4.4.8 Metalldampflöten bei Normaldruck und chemo-thermischer Oberflächenaktivierung

- ▶ Metalldampflöten bei Normaldruck (Löten in kontrollierter Atmosphäre) von beloteten Lötbaugruppen
- ▶ Scherfestigkeit von in Zinkdampf flussmittelfrei gefertigten Stahl(CuZn) Stahl-Schmelzlötverbindungen

6.4.4.9 Metalldampflöten bei Unterdruck und chemo-thermischer Oberflächenaktivierung

- ▶ Metalldampflöten bei Unterdruck (Löten in kontrollierter Atmosphäre) von beloteten Lötbaugruppen
- ▶ Metalldämpfe – Anwendung beim Schmelzlöten
- ▶ Metalldampflöten von Titan-Aluminium-Wärmetauschern
- ▶ Schmelzlöten von Titan-Aluminium-Wärmetauschern mit Bleidämpfen
- ▶ Lichtbogenpresslöten von Titan-Alumnium-Lötbaugruppen mit Titandämpfen

6.4.4.10 Schmelzlöten an Luft bei Normaldruck und chemo-thermischer Oberflächenaktivierung

- ▶ Schmelzlöten an Luft von Lötbaugruppen ...
- ▶ Selbstfließende Fertiglote – Wirkung [2] und Verbindungsgefüge [3]
- ▶ Selbstfließende CuP- und CuPAg-Fertiglote in den Staaten der GUS
- ▶ Selbstfließende Fertiglote zum Schmelzlöten von Kupferwerkstoffen

6.4.5. Oberflächenaktivierung bei Normaldruck durch mechanische Arbeit und thermische Energie

- ▶ Mechano-thermische Oberflächenaktivierung bei Normaldruck in flüssigen Loten

6.4.5.1 Flussmittelfreies Tauchlöten in Lotbädern bei Normaldruck und mechano-thermischer Oberflächenaktivierung

- ▶ Mechano-thermische Oberflächenaktivierung bei Normaldruck in flüssigen Lotbädern ...
- ▶ Flussmittelfreies Tauchlöten in Ultraschall-Lotbädern mit mechano-thermischer Oberflächenaktivierung

6.4.5.2 Flussmittelfreies Schmelzlöten in Lotschmelzen bei Normaldruck und mechano-thermischer Oberflächenaktivierung

- ▶ Mechano-thermische Oberflächenaktivierung bei Normaldruck in flüssigen Lotschmelzen ...
- ▶ Flussmittelfreies Schmelzlöten in Ultraschall-Lotschmelzen mit mechano-thermischer Oberflächenaktivierung
- ▶ Flussmittelfreies Ultraschall-Schwalllöten mit mechano-thermischer Oberflächenaktivierung
- ▶ Flussmittelfreies Schmelzlöten mit mechano-thermischer Oberflächenaktivierung mittels der Reibpaarung *Heizdraht/Lötflächen*

6.4.5.3 Flussmittelfreies Engspaltlöten bei Normaldruck oder Unterdruck und mechano-thermische Oberflächenaktivierung

▶ Mechano-thermische Oberflächenaktivierung bei Normaldruck beim Engspaltlöten ...

6.4.6 Oberflächenaktivierung bei Normaldruck durch chemisches Potenzial, mechanische Arbeit und thermische Energie

▶ Chemo-mechano-thermische Oberflächenaktivierung beim Löten unter Druck

7 Lötparamter für die Fertigung von Lötverbindungen

7.1 Fertigungsparameter bei der Fertigung der Lötverbindung

7.1.1 Lötparameter beim Löten

▶ Lötparameter für den Energie- und Stofftransport beim Löten

▶ Thermischer Lötzyklus – beim Löten mit Erwärmen über Raumtemperatur

7.1.2 Behandlungsparameter beim Löten

7.2 Werkstoffveränderungen und Lötprozesse beim Schmelzlöten

7.2.1 Stofflicher Aufbau der Lötverbindungen

▶ Werkstoffbereiche in Schmelzlötverbindungen

▶ Chemisch-physikalische Prozesse beim Fertigen von Schmelzlötverbindungen

▶ Werkstoffbereiche in unterschiedlichen Lötverbindungen

7.2.2 Verfahrensbeeinflusster Grundwerkstoff

▶ Verfahrensbeeinflusster Grundwerkstoff mit verändertem Gefüge- und Phasenaufbau beim Schmelzlöten von Stählen

▶ Kaltverformung und Anlasstemperatur – Einfluss auf Streckgrenze, Kornvolumen, elektrische Leitfähigkeit und Bruchdehnung

▶ Zugfestigkeit von Grundwerkstoff, verfahrensbeeinflusstem Grundwerkstoff und kombinierten Schweißlöt-Verbindungen

▶ Dauerfestigkeit von Grundwerkstoff, verfahrensbeeinflusstem Grundwerkstoff, Lötverbindungen und kombinierten Schweißlöt-Verbindungen

7.2.3 Lotschmelze

▶ Metall-, Mischkristall- und Eutektik-Fertiglote sowie Eutektik- und Mischkristall-Reaktionslote zum Schmelzlöten von Kupfer

7.2.3.1 Thermisches Schmelzen der Fertiglote

▶ Thermisches Schmelzen des festen AgCu-Eutektik-Fertiglotes

▶ Thermisches Vorschmelzen von Fertigloten – Untersuchungsmethode

▶ Thermisches Schmelzen des SnPb-Eutektik-Fertiglotes

7.2.3.2 Thermisches Schmelzen der Reaktionslote

▶ Laser-Übersolidus-Schmelzlötverbindungen

▶ Lichtbogen-Übersolidus-Schmelzlötverbindungen und Widerstands-Übersolidus-Schmelzlötverbindungen

7.2.3.3 Chemisches Schmelzen der Reaktionslote
- ▶ Chemisches Schmelzen des fest-festen AgCu-Eutektik-Reaktionslotes
- ▶ Aluminiumschmelzlöten mit dem fest-festen AlSi-Eutektik-Reaktionslot

7.2.4 Lötgutschmelze beim Untersoliduslöten
- ▶ Lotschmelze – Umwandlung in die Lötgutschmelze durch chemisches Schmelzen des Grundwerkstoffs
- ▶ Lötgutschmelze – chemische Zusammensetzung bei Erreichen der Löttemperatur
- ▶ Montagespalt – Einfluss auf den Grundwerkstoffanteil im Schmelzlötgut

7.2.5 Lötgutschmelze beim Übersoliduslöten

7.2.6 Chemisches Schmelzen des Grundwerkstoffs
- ▶ Phasenübergänge *fest-flüssig* und *flüssig-fest* beim Schmelzlöten und Schmelzschweißen
- ▶ Chemisches Anschmelzen des Grundwerkstoffs beim Schmelzlöten
- ▶ Schmelzrate beim Schmelzlöten

7.2.7 Diffusionszone
- ▶ Diffusionszone im verfahrensbeeinflussten Grundwerkstoff und Mischkristallschicht in der Lötgutschmelze
- ▶ Mischkristallschicht (MK) und Diffusionszone (DZ) – chemische Zusammensetzung

7.2.8 Mischkristallschicht
- ▶ Mischkristallschichten beim Schmelzlöten von Stahl, Kupfer und Messing
- ▶ Mischkristallschicht (MK) und Diffusionszone (DZ) – chemische Zusammensetzung

7.2.9 Übergangsphase
- ▶ Übergangsphasen beim Schmelzlöten einer NiCrFe-Legierung und von Kupfer
- ▶ Werkstoffbereiche in einer Cu(SnPbAg)-Schmelzlötverbindung nach Tempern und Auslagerung
- ▶ Löttemperatur und Montagespalt – Einfluss auf das Wachstum von CuSn-Phasen

7.2.10 Lötguterstarrung
- ▶ Thermische und chemische Phasenübergänge *fest-flüssig* sowie *flüssig-fest*

7.2.10.1 Thermische Erstarrung der Lötgutschmelze
- ▶ Heteroepitaxiales Wachstum der Mischkristalle des Lötgutes auf Basis der chemisch angeschmolzenen Grundwerkstoffkristallite mit Vererbung der Korngrenzen
- ▶ Wachstumsmechanismen von Primärkristalliten bei der thermischen Erstarrung beim Schmelzlöten und Schmelzschweißen
- ▶ Primärgefüge des thermisch erstarrenden Schmelzlötgutes – Einfluss der Abkühlgeschwindigkeit

7.2.10.2 Chemische Erstarrung der Lötgutschmelze

- ▶ Thermisches (isochemisches) und isothermes Schmelzlöten der Titanlegierung OT-4
- ▶ Magnesiumschmelzlöten mit Silber-Reaktionslot und isothermer Erstarrung
- ▶ Löttemperaturen und Wiederaufschmelztemperaturen beim isothermen Schmelzlöten

7.3 Lötparameteroptimierung zur Verbesserung der Verbindungswertigkeit

- ▶ Eigenschaften von Schmelzlötverbindungen – Einfluss der Abkühlgeschwindigkeit
- ▶ Verfestigung von Schmelzlötverbindungen durch Abkühlen unter Argondruck

Stichwortverzeichnis

Die fett-gedruckten Zahlen weisen auf Seiten hin, auf denen die entsprechenden Begriffe definiert und kommentiert sind

10 Gebote der Löttechnik. 7
2-D-Grenzflächen 455
2-D-Kerben, metallurgische 339
2-D-Lötoberflächen 455
2-Komponenten-Klebstoff 139
3-D-Formteile 406
3-D-Grenzflächen 344
3-D-Kerben, geometrische 340
3-D-Kerben, metallurgische 340
3-D-Metallstrukturelement 408

A

Abkühlgeschwindigkeit . . . 264, 266, 429
Abkühlprozess 263
Abkühlung 263, 398, 403
  Luftabkühlung 403
  Ölabkühlung 403
  unter Schutzgasüberdruck 264
Ablagerung 177, 338
Ablegieren, Auslegieren,
  Erosion 92, 164, 435
Abscheidung
  chemische 74
  elektrolytische 269, 359
  galvanische 74
Abschrecken 452, 460
absolute Löttemperatur **47**, 184
Abstehen, von Metallschmelzen 438
Abtragen 157, 243
adaptive Lötverbindungen **48**, 50, 66,
. . . . . 76, 352, 409, 458, 489
adaptive Presslötverbindungen **48**, 76
adaptive Schmelzlötverbindungen
. . . . . **51**, 76, 458
Adaptivverbundlote 52,
Additive 341, 436, 455, 481
Adhäsion 210, 399
Adipinsäure 379
aerodynamische Erwärmung,
von Schutzgasen 415
Affinität 327, 329, 373, 439
Ag_2O 329
Ag-Flakes 214
Aggregatzustand **53**, **54**, 79, 119,
. . . . . 198, 203, 238, 352
  betriebsspezifischer
  . . . . . 54, 121, 165, 222, 271
  fertigungsspezifischer
  . . . . . 54, 122, 271, 471
  physikalischer 56, 122
  technischer 55, 74, 122, 243, 257
Aggregatzustände, betriebsspezifische 54
Ag-Nanopulver 214
$AgNO_3$, Silbernitrat 101, 365
AI_2O_3-Keramik 209, 338
Aktivgaslöten 256
Aktivierung 133-151, 258, 291-293,
. . . . . **319-325**, 327, **332**, 333, 372,
. . . . . .377, 381-384, 412-419
Aktivierungs-Lotverbunde **56**
Aktivierungsschichten 237
Aktivierungsstoff 131-151, 256, 258,
. . . . 288, 292, 295, 319-321, 325, 327,
. . . . 333, 373, 377, 381, 384, 412-419
Aktivlot 309, 336

Akustik, akustische Anforderungen, akustische Eigenschaften 168
akustische Anforderungen 168
Al, Al-Legierungen . . . . 74, 92, 101, 105, . . .198, 277, 283, 295, 322, 335, 337, 361, 383, 415, 419, 447, 457, 464, 470, 476
$AlCl_3$ 363
Al-Fasern, Al-Wolle 115
Al-Fertiglot, Al-Lot . . . . . 73, 113, ... 186, 201, 206
AlGa-Eutektikum 335
Al-Inhibitor 127
Alitieren 243, 395, 453
Allamannische Goldscheibenfibel . . . 359
Al-Metallisierung, Al-Schichten 123, 200, 361, 395, 446
AlN-Partikel 419
Al-Schaum, Aluminiumschaum . 369, 450
AlSi-Konstruktionslot 164
AlSi-Reaktionslot 87, 476, 477
Altern 453
Aluminieren 395
Aluminiumschaum, Al-Schaum . 369, 450
Aluminiumverbundwerkstoffe 183, 421, 464
Aluminiumwerkstoffverbunde 447
Alumiuminhibitor 127
Al-Wolle 115
Amalgan 491
Ameisensäure 156, 326, 379
Anforderungen
akustische 168
haptische 168
optische 168
sensuspezische 168
anisotroper Klebstoff 59
Anisotropie der
mechanischen Eigenschaften **57**, 393
Verschleißbeständigkeit 58
Anisotropie-Effekt 59
ankristallisierte Schicht 300
Anlassen 121, 424, 453, 465
Anlauffarbe 178
anorganische Schichten, als Lotstopmittel 273
anorganische Substanzen . . 156, 190, 210
Anpressen . . 135, 138, 216, 241, 308, 312
Anriss 59, 178, 455
Anschaffungsaufwand 308
Anschlussfläche . . . . . 50, 69, 153, 158, . . . 173, 182, 218, 225, 233, 237, 273, ... 280, 299, 313, 352, 399, 445, 491
Anschmelzen
chemisches . . . . . 69, **85**, 254, ... 352, 390, 478
thermisches 187, 296, 390, 433
Antiblasen 94, 113
Antimon, Sb 59, 297, 334, 337
Anwendung von
Grenzzuständen 306
Sicherheitslösungen 306
vergegenständlichten Informationen 306
Anzahl der möglichen Stoffschlussverbindungen **61**
Arbeit . . 55, 110, 136-140, 178, 189, 191, ... 240, 245, 237, 258, 280, **319**, 491
Arbeitsgegenstand . . . . 55, 120, 236, 240, ... 252, 259, 265, 268
Arbeitsgeschwindigkeit 192
Arbeitsgestaltung 189
Arbeitskraft 120, 191, 285
Arbeitsmaterialien 236
Arbeitsmittel 120, 265, 285
Arbeitsplatzbelastung 149
Arbeitsproduktivität, Produktivität 63, 148, 188, 285, 251
Arbeitsprozess . . . . . 120, 189, 236, ... 240, 252, 259, 268
Arbeitsschutz 144, 190
Arbeitssicherheit 190, 285
Arbeitssystem 120, 190
Arbeitstemperatur 134
Arbeitsunfälle 418

Arbeitsunterlagen 205, 295
Argon 72, 143, 150, 264,
. . . . . 292, 295, 331, 382
Armco-Eisen 152
arteigene Eutektik-Lote 112, 186, 299
arteigene Fertiglote 63, 73, 85, 88,
. . . . . 94, 96, 97, 99, 102,
. . . . . 112, 118, 194, 287, 299
arteigene Kompaktlote **62**
arteigene Mischkristall-Lote 186, 299
arteigene Reaktionslote 187
arteigener Metalleinschluss 94, 115
artfremde Eutektik-Lote 186, 299
artfremde Fertiglote 118, 299
artfremde Kompaktlote **63**
artfremde Mischkristall-Lote . . . 186, 299
artfremde Reaktionslote 187
Atombindung 61, 442
Atomtechnik 404
Ätzen, chemisches 339
Au_2O_3 329
Aufbau technischer Oberflächen 178
Aufbürsten von Loten 141
Aufdampfen 83, 218,
Aufgaben der Rationalisierung **63**
aufgebrachtes Lotdepot 145
Aufhärten, Aushärten, Härten . . 129, 139,
. . . . 195, 214, 280, 283, 422, 424, 453
Aufkohlen, Aufkohlungspaste,
Aufkohlungspulver,
Aufkohlungsverfahren . 307, 424, 434
Auflegieren, Auflegierung 69, 87, 91,
. . . . . 390, 395, 435
Auftraglöten, Auftragungslöten 118, 136,
. . . . . 288, 304, 421
Auftragschweißen,
Auftragungsschweißen . 106, 108, 114
Auftragungslöten, Auftraglöten . . . . . .
. . . . . 118, 136, 288, 304, 321, 421
Auftragungsschweißen,
Auftragschweißen 106, 108, 114
aufwandsarme Lötfertigung . . 50, 125, 372
Ausbreitungsfläche 152
Ausbringung von Metallen 57
Au-Schichten 71, 105, 201, 380
Ausdampfen 292, 294, 325, 435
Ausdehnung, thermische . . . 57, 149, 177,
. . . . . 285, 324, 327, 328,
. . . . . 329, 371, 377, 383
Ausdehnungsfehlanpassung . . . 133, 135,
. . . . . 140, 142, 292, 319, 325,
. . . . . 382-384, 412, 417, 419
Ausdehnungskoeffizient . . . 57, 160, 164,
. . . . . 221, 223, 314, 331, 371, 376
Ausdehnungsrisse 376
Ausfall, Ausfallort, Frühausfälle
. . . . . 59, 69, 495
Ausfallanalyse, Ausfallursachen . . 59, 377
Ausfallrate 76
Ausgangseigenschaften 70, 120, 409
Ausgangszustand . . 97, 294, 411, 459, 486
Aushärten, Aufhärten, Härten . . 129, 139,
. . . . 195, 214, 280, 283, 422, 424, 453
Auslagern 332, 422, 443,
Auslegieren, Ablegieren, Erosion
. . . . . 92, 164, 435
Auslegung, der Lötverbindung . . 78, 111,
. . . . . 121, 126, 246, 460, 466, 470
Auslöttemperatur der Lötverbindungen
. . . . . 52, **64**, 132, 197, 203,
. . . . . 220, 227, 394, 436, 490
Ausschuss 111, 349
äußere Grenzflächen
. . . . . 153, 155, 180, 317, 325
Autoadhäsion 210
Automatisierung, automatisch
. . . . . 114, 148, 190, **284**, 302, 350
Automobilbau, Automobilindustrie
. . . . . 70, 122, 168, 181, 295, 363, 383
autonomes Schmelzen 87
Autoschutzgas, Autoschutzgaslöten
. . . . . 134, 216, 253, 304,
. . . . . 311, 379, 424, 460
Autovakuumlöten **133**, 256, 309,
. . . . . 311, 327, 373

B

B, Bor 60, 405, 463

Bandgeschwindigkeit 266

Barriereschichten . . . . . 68, 71, 135, 138, ... 219, 237, 257, 319

Bauelement 116, 233, 235, 265, 393, 408

baugruppenneutrale Lötvorrichtung . . 271

baugruppenspezifische Lötvorrichtung 271

Baustahl . . . . . 69, 91, 187, 248, 251, ... 422, 426, 429, 446, 465

Bauteilanschluss, Bauteilgestalt, Bauteilvolumen . . . . . 71, 150, 157, ... 213, 219, 224, 232, 242, 248, ... 256, 259, 326, 385, 402, 478

Bauteilgestalt, Bauteilvolumen, Bauteilanschluss . . . . . 71, 150, 157, ... 213, 219, 224, 232, 242, 248, ... 256, 259, 326, 385, 402, 478

Bearbeitungsschicht 487

Bearbeitungstemperatur 123

bedienerarme Fertigung . . . . . 64, **284**, ... 305, 350

bedienerfreie Lötfertigung 192, 305

Bedingungen, irdische . . . . 154, 163, 177, ... 220, 256, 268, 315, 392, 484, 491

Bedingungsleichtbau 308

Behandlung vor, nach und während des Lötens . . . . . 143, **280**, **281**, 293, 382, ... 403, **421**, **422**, 423, **426**, ... **434**, **436**, 438, **440**, **452**, 453

Behandlungsparameter beim Löten **70**, 120, 281

Beilby-Schicht 486

Belastbarkeit der Lötverbindung . . . . . 52, ... 204, 489

Benetzbarkeit 111, 237, 333, 336

Benetzung . . . . . 134, 142, 201, 218, 233, ... 273, 295, 334, 379, 442

Benetzungsfläche 380

Benetzungsschicht . . . . . **70**, 200, 202, ... 218, 237, 362

Beschichten, Beschichtung . . . 49, 69, **73**, ... 101, 115, 157, 161, 204, 228, ... 242, 250, 323, 357, 396, 419

Beschichten, zum Löten . . . . **73**, 98, 158, ... 242, 244, 396

Betriebsbedingungen . . . . 48, 53, 75, 163, ... **149**, 221, 394, 408, 450

Betriebsdauer **75**

Betriebsspannungen . . . 49, 161, 367, 370

betriebsspezifischer Aggregatzustand 54, 121, 165, 222, 271

Betriebstemperatur
- erhöhte . . . . 49, 66, 78, 96, 110, 118, ... 121, 123, 126, 132, 164, 220, ... 227, 362, 410, 436, 443,470, 490
- homologe 75, 121, 220, 271, 470
- zulässige 65, 229

bewegliche Lötverbindung, bewegliche Fügeverbindung . . **78**, 80, ... 121, 159, 241, 408

Bi, Bismut 80, 165, 333, 470

Biegefestigkeit 393

Biegewechselfestigkeit 59

Biegewinkel 57, 67, 223

Bimetalle 279

Bindefehler 478

Bindung, chemische 61, **81**, 400

Bindungsenergie 327

Biokeramik 61

Blankglühen 307

Bläschen, negative 94

Blasen 94, 113, 277, 322, **345**, 448

Blasen, Poren . . . . . 113, 169, 201, 277, ... 336, **345**, 364, 438, 461

Blech-Blech-Verbindungen 246

Bleidämpfe, Pb-Dämpfe 201, 295

bleifrei . . . . 57, 60, 70, 98, 114, 117, 166, ... 190, 201, 204, 227, 338, 377, 384

Bonden 105, 488

Bonden, eutektisches 355

Bondverbindungen 104

Bor, B 60, 405, 463