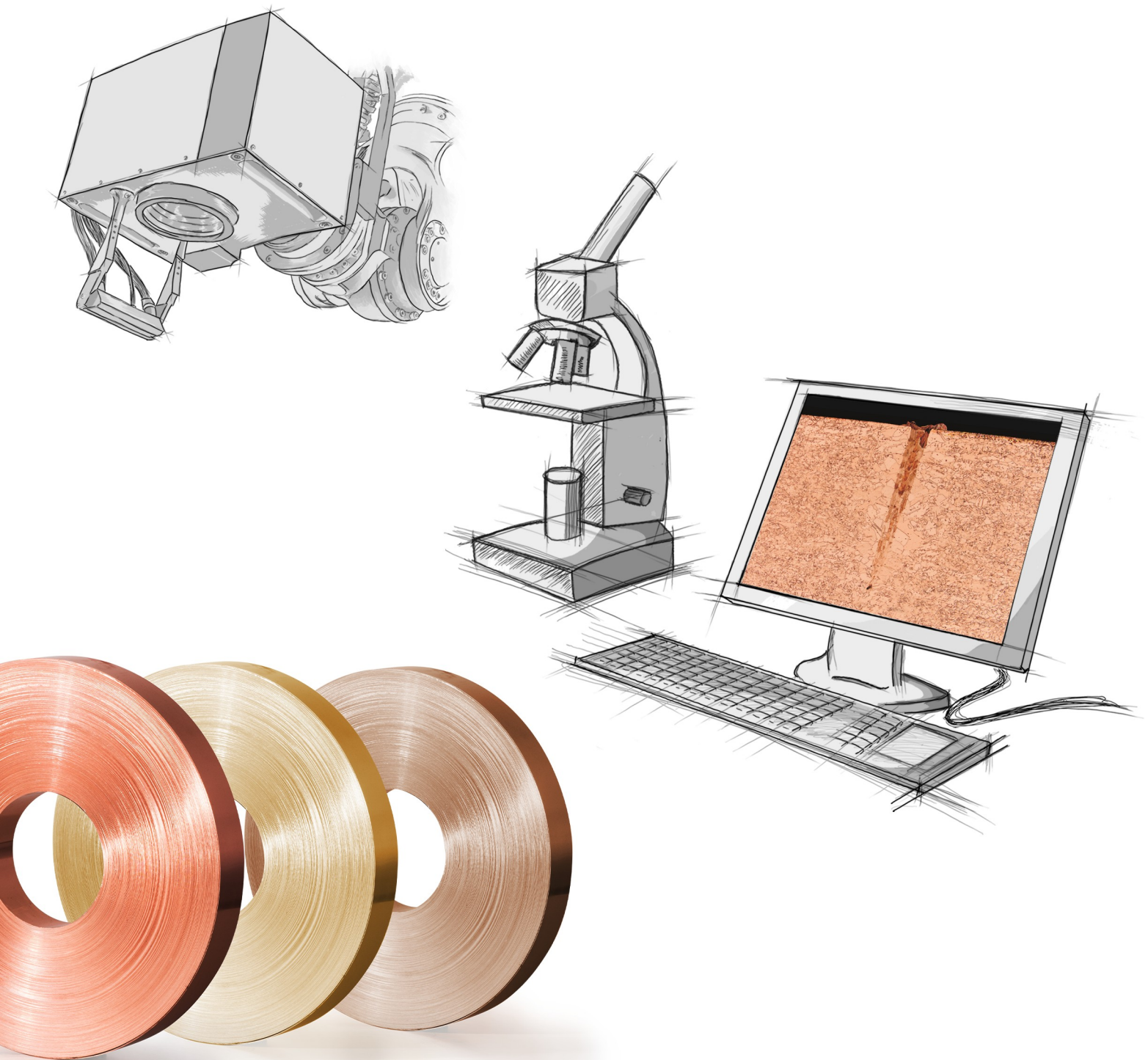


Schweißen von Komponenten aus Kupfer- und Kupferlegierungsbandern



Inhaltsverzeichnis

1. Vorwort	4
2. Schweißbarkeit – ein komplexes Thema	5
3. Schweißverfahren für Produkte aus Kupfer- und Kupferlegierungsbändern	6
3.1 Widerstandsschweißen	6
3.2 Laserstrahlschweißen	10
3.2.1 cw-Laserschweißen	10
3.2.2 Laserpunktschweißen	14
3.3 Elektronenstrahlschweißen	15
3.4 Schutzgasschweißen	16
3.4.1 WIG-Schweißen	16
3.4.2 MIG-Schweißen	17
3.4.3 Zusatzwerkstoffe für das Schutzgasschweißen	17
3.5 Ultraschallschweißen	18
4. Metallkundliche Aspekte beim Schmelzschweißen von Kupfer und Kupferlegierungen	20
4.1 Reinkupfer	20
4.2 Ausscheidungshärtende Kupferlegierungen	22
4.3 Zinnbronze	23
4.3.1 Schweißnahtausbildung	23
4.3.2 Mikrostrukturelle Vorgänge	24
4.3.3 Heißrissanfälligkeit	24
4.3.4 Einfluss des Phosphorgehaltes / der Abgusstechnik	25
4.4 Cu-Zn-Legierungen	26
4.5 Cu-Ni-Legierungen und Neusilber	27
5. Hinweise zu metallischen Beschichtungen und Benzotriazol	28
5.1 Zinn	28
5.2 Nickel	29
5.3 Silber	30
5.4 Temporärer Korrosionsinhibitor Benzotriazol	30

1. Vorwort

Schweißverbindungen an Kupfer und Kupferlegierungen zeichnen sich prozesstechnisch durch ihre hervorragende Anbindesicherheit und Reproduzierbarkeit sowie werkstofftechnisch durch geringe Übergangswiderstände aus. Das Schweißen ist daher neben den mechanischen Verfahren und dem Löten eine der am häufigsten angewandten Füge Technologien für Kupfer und Kupferlegierungen.

Im Bereich der Elektrotechnik/Elektronik werden Komponenten aus Bandwerkstoffen dabei meist mit Hilfe der beiden am stärksten etablierten Verfahren Widerstands- oder Laserstrahlschweißen gefügt. Ferner gewinnen Ultraschallschweißverbindungen zunehmend an Bedeutung. Elektronenstrahl- und Schutzgasschweißen sind weitere Schweißverfahren, welche bei Kupfer und Kupferlegierungen ebenfalls Anwendung finden, wenn auch seltener.

Grundsätzlich sind alle Reinkupfersorten und Kupferlegierungen mit jedem Verfahren schweißbar. Entscheidend ist dabei die Auswahl und Einstellung der Parameter an den Schweißanlagen. Die häufig zu hörende Aussage, Kupfer sei schlecht schweißbar oder nicht schweißgeeignet, basiert auf der Andersartigkeit von Kupferwerkstoffen gegenüber dem, was schweißtechnisches Personal und Ingenieure vornehmlich von Eisenwerkstoffen gewohnt sind. Als Beispiel sei hier genannt, dass Kupfer die Schweißwärme viel schneller ableitet als Stahl. Auch besitzt Kupfer eine viel höhere Reflektivität gegenüber IR-Strahlung, was die Einkopplung von Laserstrahlung erschwert. Es ist also die Aufgabe von Kupferverarbeitern, diese besonderen Eigenschaften hinsichtlich der Schweißeignung von Kupferwerkstoffen bei der Einstellung der Schweißparameter zu berücksichtigen.

Forschung und Entwicklung in Instituten und in der kupferverarbeitenden Industrie haben sich in den letzten Jahrzehnten intensiv der Aufgabenstellung gewidmet, schweißtechnisches Wissen rund um Kupfer zu generieren und den Anwendern das Verschweißen von Kupferwerkstoffen als einfach handhabbaren, industriellen Prozess zur Verfügung zu stellen.

Die vorliegende Broschüre gibt Hinweise zur Schweißeignung der Wieland-Bandwerkstoffe, bezogen auf die gängigsten Schweißverfahren, welche an Bauteilen aus Bandwerkstoffen zum Einsatz kommen, und versteht sich als Ergänzung zur einschlägigen Fachliteratur.

2. Schweißbarkeit – ein komplexes Thema

Das Schweißen stellt eine Gruppe stoffschlüssiger Verbindungstechniken dar, welche unlösbare Verbindungen von Bauteilen unter Anwendung von Wärme und/oder Druck, mit oder ohne Schweißzusatzwerkstoffen realisieren.

Die Schweißbarkeit eines Bauteils ist maßgeblich von den drei Einflussgrößen Werkstoff, Konstruktion und Fertigungsverfahren abhängig. Diese Parameter üben komplexe Wechselwirkungen aufeinander aus, weshalb bei der Beurteilung schweißtechnischer Fragestellungen nicht nur der Werkstoff allein bewertet werden darf. Vielmehr ist eine ganzheitliche Betrachtung der kompletten Schweißkonstruktion mitsamt ihrer Peripherie, wie bspw. Spannmittel und benachbarte Baugruppen sowie des Bauteildesigns zielführend.

Gemäß Abb. 1 beschreibt der Begriff Schweißbeignung eine reine Werkstoffeigenschaft. Sie ist gegeben, sobald die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Werkstoffs eine den Anforderungen entsprechende Schweißung zulassen. Bei Schmelzschweißverbindungen spielt hierbei die chemische Zusammensetzung des Werkstoffs die zentrale Rolle, bei Pressschweißverbindungen (bspw. Ultraschallschweißen) dominieren mechanisch-technologische Parameter wie Härte und Rauheit. Die Schweißbeignung ist umso besser einzuschätzen, je geringer der Einfluss der Werkstoffeigenschaften bei der Festlegung der schweißtechnischen Fertigungsverfahren für eine bestimmte Konstruktion ist.

Die Schweißsicherheit einer Konstruktion ist vorhanden, wenn mit dem verwendeten Werkstoff das Bauteil aufgrund seiner konstruktiven Gestaltung unter den gegebenen Betriebsbedingungen funktionsfähig

bleibt. Die Schweißsicherheit wird somit u.a. von der Nahtform, -geometrie, -anzahl und -anordnung sowie der Bauteilgeometrie bestimmt.

Die Schweißmöglichkeit einer schweißtechnischen Fertigung ist dann gegeben, wenn die an einer Konstruktion vorgesehenen Schweißungen unter den gewählten Fertigungsbedingungen fachgerecht hergestellt werden können. Stoßart, Bauteilzugänglichkeit sowie Art und Menge der Energiezuführung charakterisieren diesen Aspekt der Schweißbarkeit.

Auch für Schweißsicherheit und -möglichkeit gilt, dass diese umso besser ausgeprägt sind, je weniger sie die jeweils anderen Einflussfaktoren auf die Schweißbarkeit des Bauteils beeinträchtigen.

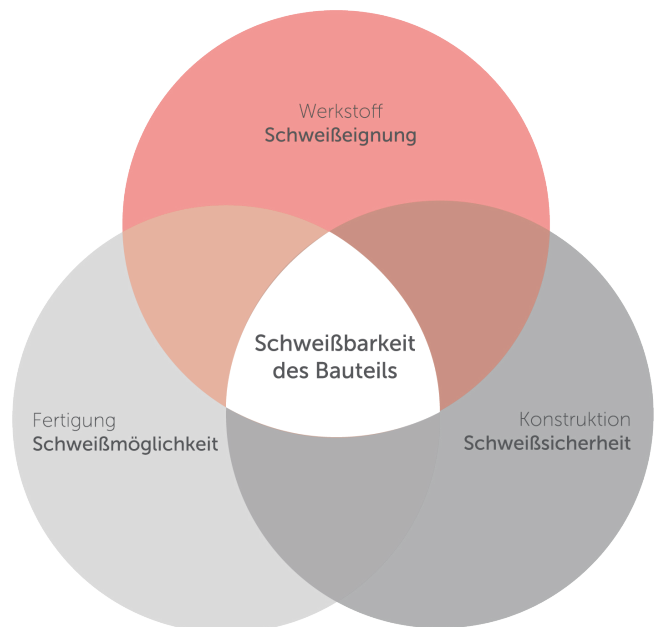


Abbildung 1 – Einflussparameter auf die Schweißbarkeit von Bauteilen nach DIN 8528-1.

3. Schweißverfahren für Produkte aus Kupfer- und Kupferlegierungsbändern

3.1. Widerstandsschweißen

Bereits seit Jahrzehnten wird das Widerstandsschweißen, neben dem Widerstandslöten, aufgrund seiner hohen Produktivität und der reproduzierbaren Nahtqualität an Kupfer und Kupferlegierungen angewandt.

Dabei werden auf- oder aneinandergespresste Bauteile, meist im Überlappstoß, mittels Widerstandserwärmung verschweißt. Dabei kann sich, je nach Schweißparameterwahl, Bauteildesign und Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffs eine typische Schweißlinse bilden. In der Elektrotechnik/Elektronik wird der Prozess üblicherweise derart ausgelegt, dass Schweißverbindungen im festen Zustand, ohne ausgeprägte Schweißlinse entstehen. Die Bauteile werden dabei auf max. 80 % Ihrer Schmelztemperatur erwärmt und die Verbindung über den Elektrodendruck realisiert. Die Verbindungsbildung geschieht schließlich im Wesentlichen über Diffusion. Eine derartige Prozessführung bietet den Vorteil geringer Spritzerbildung.

Generell muss beim Widerstandsschweißen von Kupfer und hoch kupferhaltigen Legierungen aufgrund der hohen elektrischen Leitfähigkeit mit hohen Stromstärken gearbeitet werden. Ferner ist entscheidend, dass Geometrie und Werkstoff der Elektroden sowie die Schweißparameter (insb. Stromstärke und Elektrodenanpresskraft) auf die Geometrie und Werkstoffe der Fügepartner dahingehend abgestimmt sind, dass bei Stromfluss die höchste Stromdichte im Gesamtaufbau an der Fugestelle vorliegt. Im einfachsten Fall wird dies durch einen relativ großen Elektrodenquerschnitt im Vergleich zum Bauteilquerschnitt verwirklicht. Zur Erreichung besonders hoher Reproduzierbarkeit dient das Buckelschweißen, wobei zunächst in eines der zu fügenden Bauteile ein Buckel definierter Geometrie eingeprägt wird. Anschließend erfolgt die Verschweißung mit dem Fügepartner, wobei dieser ebenfalls eingeprägte Buckel haben kann.

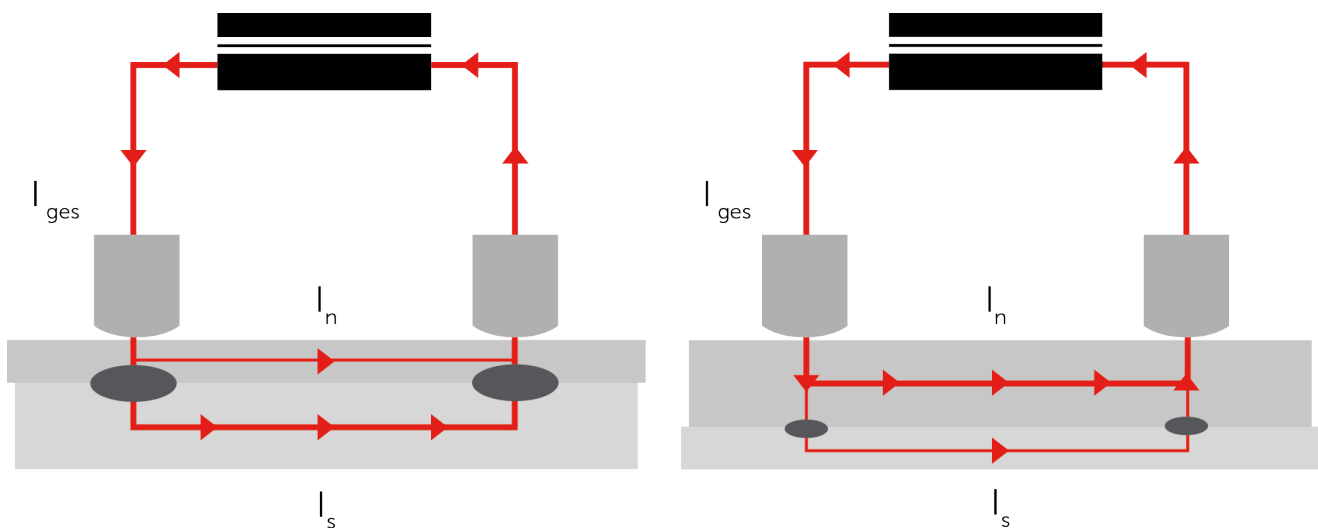


Abbildung 2 – Nebenschluss aufgrund falscher Bauteilanordnung

Nimmt der Strom nicht den vorgesehenen Pfad durch die zu fügenden Bauteile, sondern wird teilweise oder vollständig durch die Fügepartner selbst oder benachbarte Schweißnähte bzw. stromführende Komponenten geleitet, tritt ein Nebenschluss ein. In dessen Folge entstehen zu kleine oder unzureichend feste Schweißverbindungen. Ursächlich für diesen Fehler sind falsch ausgelegte Elektroden- oder Bauteilgeometrien, falsche Bauteilanordnung, zu eng nebeneinanderliegende Schweißpunkte oder ungünstig ausgewählte Werkstoffe bei gegebenem Bauteildesign, Beispiele hierzu siehe Abbildungen 2 bis 4.

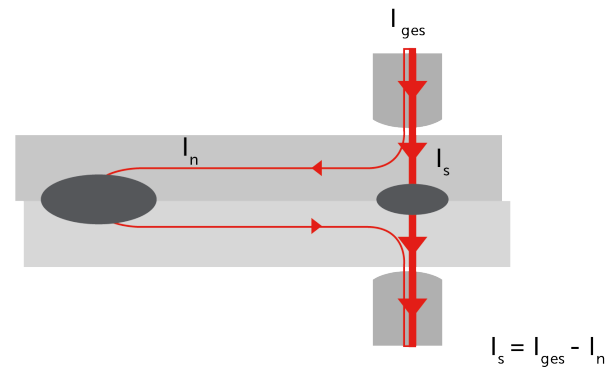


Abbildung 3 – Nebenschluss aufgrund zu eng nebeneinanderliegender Schweißpunkte

Die korrekte Auswahl der Elektrodenwerkstoffe stellt den ersten wichtigen Schritt zur Erreichung reproduzierbarer Schweißverbindungen dar. Zum Schweißen von Fügepartnern aus hochleitfähigen Werkstoffen wie Reinkupfer und niedriglegierten Kupferlegierungen wird die Verwendung von Molybdän oder mit geringen Anteilen von Titan, Zirkonium und Kohlenstoff legiertes Molybdän (TZM), Wolfram oder Wolfram-Lanthanoxid, insbesondere WL10/WL20, oder Wolfram-Kupfer (WCu) als Elektrodenwerkstoff empfohlen. Diese Werkstoffe kennzeichnen ein hoher

Schmelzpunkt und eine gute Wärmeleitfähigkeit. TZM zeichnet sich im Vergleich zu reinem Molybdän durch eine höhere Warmfestigkeit und eine geringere thermische Dehnung aus. WL10 weist gegenüber dem reinen Wolfram eine geringere Elektronenaustrittsarbeit, erhöhte Kriechbeständigkeit und bessere spanende Bearbeitbarkeit auf. Statt der reinen Refraktärmetalle können auch Elektroden aus CuCrZr-Werkstoffen mit eingelöteten Einsätzen aus Molybdän, TZM, Wolfram verwendet werden.

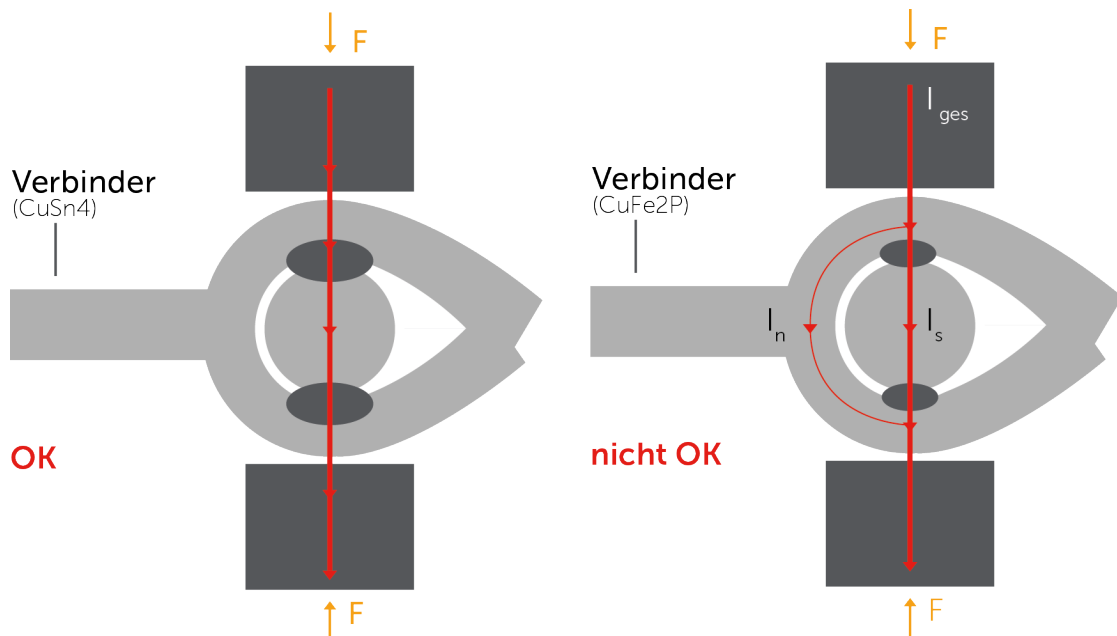


Abbildung 4 – Nebenschluss aufgrund nicht an den Werkstoff angepasster Bauteilgeometrie (rechts) – bei der abgebildeten Bauteilgeometrie ist die Schweißung mit einem Verbinder aus Wieland-B14 (CuSn4) realisierbar, mit einem Verbinder aus Wieland-K65 (CuFe2P) jedoch nicht, da dieser Werkstoff eine höhere elektrische Leitfähigkeit besitzt und den Schweißstrom somit an der Fügestelle vorbeileitet. Schweißparameter, Werkstoff und Bauteildesign sind im rechten Bild folglich unzureichend aufeinander abgestimmt.

Zum Schweißen von Werkstoffen mit relativ geringer elektrischer Leitfähigkeit, insbesondere CuSn- und CuZn-Legierungen empfehlen wir Elektrodenkappen

aus CuCr1Zr (Elmedur X) und CuZr (Elmedur Z). Beide Werkstoffe sind niedrig legierte, ausgehärtete Kupferlegierungen mit hoher Festigkeit und Härte.



Abbildung 5 – Produkte von Wieland Duro

CuCr1Zr erfüllt in hohem Maße sämtliche Anforderungen an Elektrodenwerkstoffe wie hohe Härte, Verschleißbeständigkeit, thermische Beständigkeit und geringe Anlegierungseigenschaften.

CuZr besitzt den Vorteil einer um ca. 10 % höheren Leitfähigkeit und bietet somit die Möglichkeit, mit geringeren Stromstärken zu schweißen und weniger Wärme an der Grenzfläche Elektrode/Blech zu erzeugen. Somit erhöht sich die Standzeit der Elektrodenkappen und die Anlegierungsneigung wird weiter reduziert. Nachteilig dagegen ist, wegen des fehlenden Legierungselementes Cr, die geringere Härte und Verschleißfestigkeit.

Weitere Informationen zu den Elektrodenwerkstoffen der Wieland-Gruppe sind auf der Website von Wieland Duro erhältlich (wieland-duro.com).

Infolge von Anhaftungen (Anlegierungen) müssen Elektroden häufig überarbeitet bzw. ausgewechselt werden, weil die zum Schweißen nötige Stromerwärmung nicht mehr prozesssicher reproduzierbar ist. Zur Reduzierung derartiger Anhaftungen und einer damit verbundenen Erhöhung der Elektrodenstandzeit ist es empfehlenswert, Fügepartner zu verwenden, die mit einer Beschichtung versehen sind. Verzinnungen mit einer Dicke von 1–3 µm eignen sich hierfür im Besonderen. Die Zinnschicht besitzt eine geringe Härte, stellt dadurch einen hervorragenden elektrischen Kontakt zur Elektrode her und schützt die Elektroden vor Anhaftungen. Sie schmilzt aufgrund ihres geringen Schmelzpunktes (232 °C) beim Widerstandsschweißen zwischen den Fügepartnern zuerst auf und wird durch die Nachsetzbewegung der Elektroden aus der Fügezone herausgepresst. Eine Auflegierung der Schweißzone mit Zinn kommt daher nur selten vor. Ein weiterer Vorteil der Zinnschicht besteht in der Vergrößerung der realen Kontaktfläche in den Ebenen Elektrode-Blech

und Blech-Blech. Dies mindert die Gefahr von lokalen Hotspots und Schweißspritzern. Zu bedenken ist, dass es an der Kontaktstelle Elektrode-Blech aufgrund des sehr geringen Schmelzpunktes von Zinn (232°C) und abhängig von Elektroden-/Bauteildesign sowie von der Stromstärke zur Zerstörung der Beschichtung bzw. lokaler Schichtdickenreduzierung kommen kann. Eine Verfahrensvariante des Widerstandsschweißens stellt das Widerstandsrollnahtschweißen dar. Hierbei sind die Elektroden rollenförmig ausgeführt, drehbar gelagert und werden unter der Wirkung des Anpressdrucks über die zu verbindenden Bauteile geführt. Auf diese Weise lassen sich dichte und geschlossene Nähte durch Erzeugung mehrerer, sich überlappender Schweißpunkte unmittelbar hintereinander erzeugen. Der Nebenschluss stellt hierbei kein praxisrelevantes Problem dar, da die Temperatur und damit auch der elektrische Widerstand im unmittelbar zuvor geschweißten Bereich noch sehr hoch sind.

FAZIT:

Kupferwerkstoffe sind widerstandsschweißgeeignet. Besonders zu achten ist dabei auf

- die korrekte Auswahl der Elektrodenwerkstoffe
- die Verwendung einer Beschichtung zur Erhöhung der Elektrodenstandzeit
- eine Feinabstimmung zwischen Schweißparametern, Bauteildesign und Werkstoff der Fügepartner

3.2. Laserstrahlschweißen

Das Laserstrahlschweißen zeichnet sich durch geringen Energieeintrag, geringen Bauteilverzug, hohe Schweißgeschwindigkeit und schlanke Nahtgeometrien aus. Ferner ist es möglich, durch programmierbare Fokussieroptiken (PFO) den Laserstrahl örtlich flexibel zu positionieren und somit verschiedene Nahtgeometrien zu erzeugen.

Beim Laserstrahlschweißen von Kupfer und Kupferlegierungen kommen häufig Festkörperlaser hoher Brillanz mit Ausgangswellenlängen um $1\ \mu\text{m}$ (IR-Bereich) zur Anwendung. Laserquellen, welche Laserlicht im sichtbaren Bereich des Lichts emittieren (insb. im grünen und blauen Bereich) finden am Markt stetig neue Anwendungsfelder.

Der beim Laserstrahlschweißen auf den Fügepartnern auftreffende Laserstrahl wird zu einem Teil vom Werkstoff reflektiert, der andere Teil wird absorbiert. Der absorbierte Anteil der Laserstrahlung wird in Wärme umgewandelt, welche zum Aufschmelzen des Werkstoffes dient. Der Absorptionsgrad hängt im Wesentlichen von der Wellenlänge der verwendeten Laserstrahlung, deren Einfallswinkel sowie der Art des Grundwerkstoffes und dessen Oberflächenbeschaffenheit (Rauheit, Oxidschichten, organische Verunreinigungen) ab.

Die zentrale Herausforderung beim Laserstrahlschweißen ist der geringe Absorptionsgrad des festen Kupfers gegenüber der in der Materialbearbeitung häufig verwendeten infraroten Laserstrahlung. Lediglich ca. 4 % der auftreffenden Laserstrahlung werden vom festen Kupfer (blanke, glänzende Oberfläche) absorbiert. Zur Erzeugung eines Schmelzbades ist damit eine sehr hohe Energiedichte notwendig. Das erzeugte Schmelzbad absorbiert anschließend ca. 10 % der einfallenden IR-Strahlung. Es kommt also zu einem Absorptionssprung beim Phasenwechsel. Dieser bewirkt eine rasche Erwärmung der Kupferschmelze und die Bildung von lokalen Hotspots im Schmelzbad, wodurch es häufig zu Schweißnahtfehlern wie Spritzern, Auswürfen und Poren kommt. Verstärkt wird diese Problematik außerdem durch die geringe Viskosität der Kupferschmelze und die hohe Wärmeleitfähigkeit des festen, das Schmelzbad umgebenden Grundmaterials, welches die Schweißwärme sehr schnell aus dem Nahtbereich ableitet. Folglich muss bei steigendem Bauteilvolumen mit immer höherem Energieeintrag gearbeitet werden, wodurch die Auftretenswahrscheinlichkeit von Spritzern und Auswürfen steigt.

3.2.1. cw-Laserschweißen

Beim Schweißen mit kontinuierlich emittierter Laserstrahlung („continuous wave“ – cw) wird prinzipiell zwischen zwei Prozessführungsvarianten unterschieden – Wärmeleitungsschweißen und Tiefschweißen. Ab einer Leistungsdichte von ca. 10^6 – $10^8\ \text{W}/\text{cm}^2$ geht der Wärmeleitungs- in den Tiefschweißprozess über. Die Unterschiede zwischen beiden Prozessen können jedoch auch anhand des praxistauglicheren Kennwerts Streckenenergie (Quotient aus Laserleistung und Vorschub) verdeutlicht werden (Abb. 7).

Beim Wärmeleitungsschweißen wird mit geringer Streckenenergie gearbeitet, wodurch lediglich das zu schweißende Material aufgeschmolzen wird. Die Prozessstabilität ist bei dieser Arbeitstechnik hoch, die Einschweißtiefe jedoch gering. Derart erzeugte Nähte sind flach ausgeprägt und eignen sich zum Verbinden dünner Bauteile.

Tiefschweißen (Abb. 6 und 7) kommt zur Anwendung, wenn höhere Einschweißiefen erzielt werden sollen. Hierzu wird mit erhöhter Streckenenergie gearbeitet. Das Laserlicht wird so stark von der Schmelze absorbiert, dass deren Temperatur über die Verdampfungstemperatur steigt. Der Druck des abströmenden Dampfes verdrängt die Schmelze – eine Dampfkapillare (Keyhole) entsteht. Bei der Bewegung des Laserstrahls durch das Werkstück umfließt die Schmelze die Dampfkapillare, erstarrt an deren Rückseite und hinterlässt eine schlanke, tiefe Schweißnaht. Bei zu hoher Streckenenergie ist dieser Prozess anfällig für Schweißnahtfehler wie Auswürfe, Spritzer, Poren und Durchschüsse.

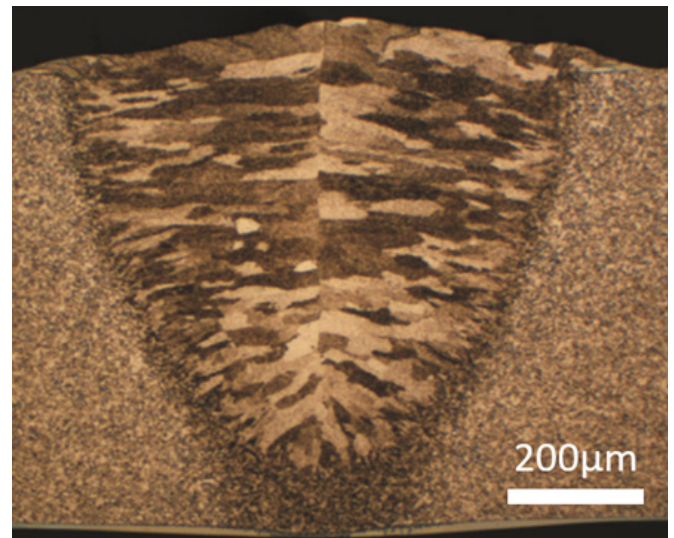


Abbildung 6 – Tiefschweißnaht in Wieland-B16

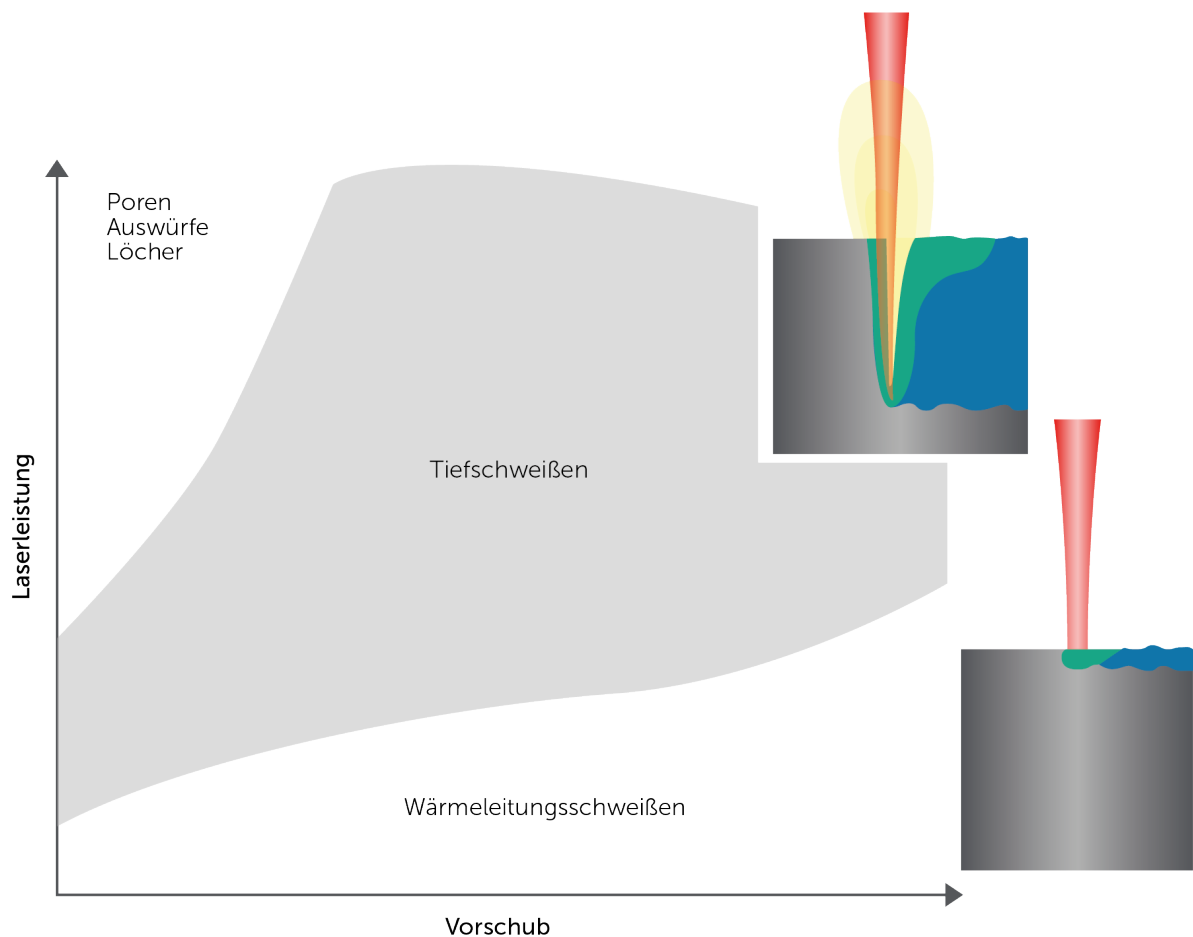


Abbildung 7 – Prozessfenster beim cw-Laserstrahlschweißen

Um den Laserschweißprozess zu stabilisieren und somit das Prozessfenster für das Tiefschweißen zu erweitern, haben sich u.a. folgende Schweißstrategien etabliert:

Leistungsmodulation

Die Laserleistung wird über die Schweißnahtlänge nicht konstant gehalten, sondern mit einer Frequenz in der Größenordnung 100–1000 Hz meist sinusförmig moduliert. Hierdurch ergibt sich eine regelmäßige Aufheizung und Abkühlung des Schmelzbades wodurch die Entstehung von Hotspots und damit von Schweißnahtfehlern vermindert wird.

Örtliche Modulation

Der Auftreffpunkt des Laserstrahls wird mit definierter Frequenz und Amplitude senkrecht und/oder parallel zur Schweißrichtung ausgelenkt. Bei rein senkrechter Auslenkung zur Schweißrichtung ergibt sich somit eine sinusförmige Bahn des Spots. Werden senkrechte und parallele Pendelung überlagert, ergibt sich eine helixförmige Bahn. Diese Variante ist unter dem Begriff „Wobbeln“ bekannt. Durch die Pendelung des Strahls wird die Prozesswärme gleichmäßiger in der Naht verteilt und die Schmelzbaddynamik beeinflusst. Ferner kann dadurch auch die Nahtform gezielt eingestellt werden.

Verwendung einer Laserstrahlung mit Wellenlängen < 1 µm

Sichtbares, grünes Licht mit einer Wellenlänge von 515 nm wird vom Feststoff Kupfer mit ca. 37 % deutlich besser absorbiert als infrarotes Licht (Abb. 8). Durch die höhere Absorption verbessert sich das Aufschmelzverhalten

des Materials. Ferner findet beim Phasenwechsel in den flüssigen Zustand ein negativer Absorptionssprung auf ca. 26 % statt, weshalb es auch nicht zu sprunghaften Schmelzbadüberhitzungen und somit zu weniger Nahtfehlern wie Spritzern kommt. Die sogenannten „grünen Laser“ finden daher in immer mehr Bereichen der industriellen Fertigung Anwendung. Auch das Schweißen mit Laserstrahlung im Bereich des sichtbaren blauen Lichts (460 nm) wird zunehmend erforscht und am Markt angeboten. Durch die geringe Wellenlänge verspricht man sich eine noch größere Prozesssicherheit.

Laserstrahlschweißen im Vakuum

Durch die Verwendung eines verringerten Umgebungsdrucks (ca. 10^0 bis 10^{-2} mbar) wird der Siedepunkt des Metalls reduziert. Somit dampft das Metall beim Tiefschweißen bereits bei geringeren Temperaturen ab. Der geringere Temperaturgradient zwischen Dampfkapillare und Schmelze resultiert in einem geringeren Schmelzbadvolumen. Der gesamte Tiefschweißprozess läuft somit kühler und stabiler ab. Die Gefahr von Poren- und Spritzerbildung wird auf diese Weise reduziert. Ferner lassen sich höhere Einschweißtiefen erzielen als beim Laserschweißen bei Normaldruck.

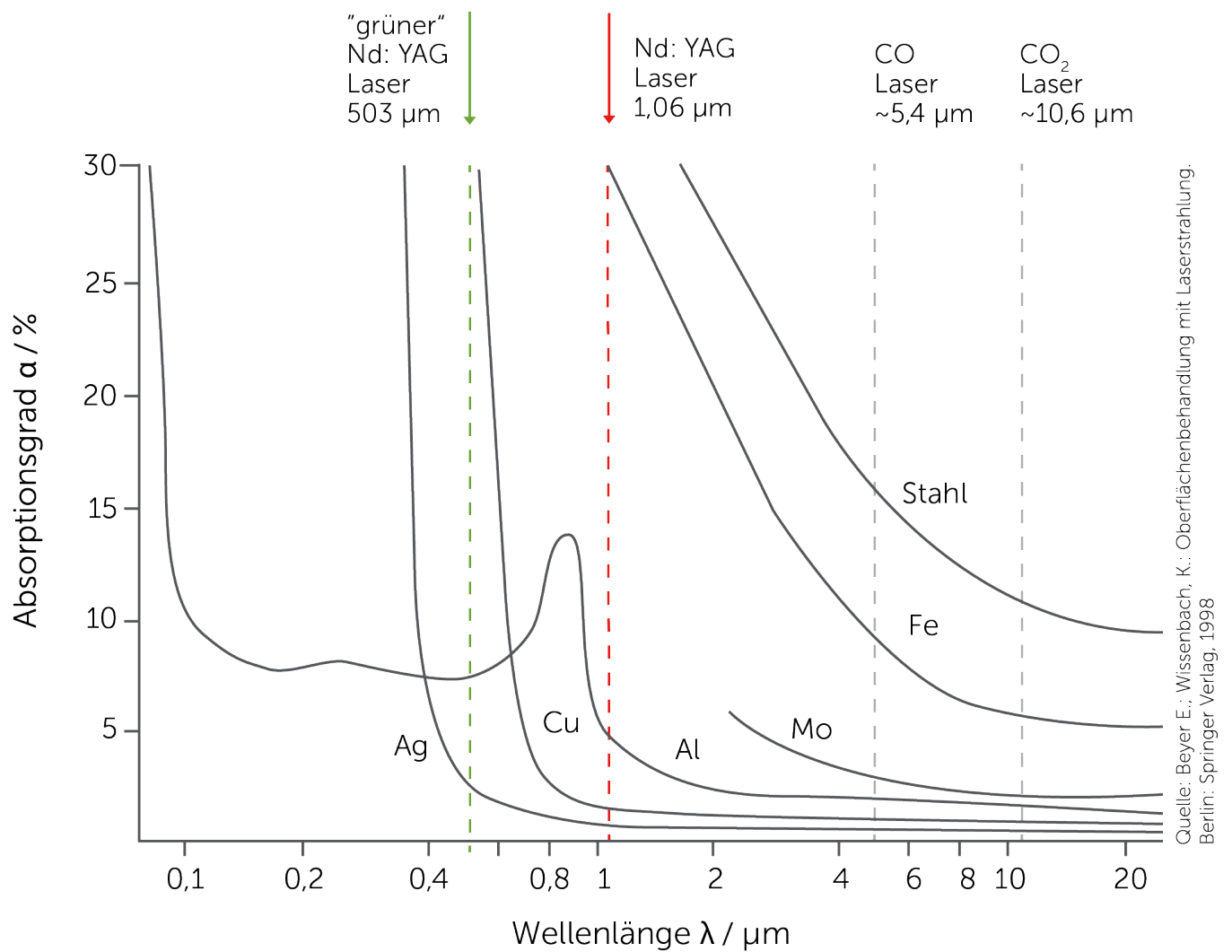


Abbildung 8 – wellenlängenabhängiges Absorptionsvermögen verschiedener Materialien

3.2.2. Laserpunktschweißen

Laserpunktschweißen wird bei der Verarbeitung von kleinen, stromführenden Kontakten, insbesondere solchen mit geringer Materialstärke angewendet. Es wird keine kontinuierliche Liniennaht, sondern lediglich ein Schweißpunkt durch einen wenige Millisekunden andauernden Laserpuls erzeugt. Häufig wird mit infraroter Laserstrahlung gearbeitet. Die auf das Material einwirkenden Energiemengen sind geringer (wenige Joule) und die Schweißzeiten deutlich kürzer als beim cw-Schweißen. Die unter 3.2. beschriebenen Herausforderungen beim Schweißen von Kupferwerkstoffen und die Beschaffenheit der Festkörperoberfläche des Kupfers bekommen eine noch stärkere Bedeutung. Lokale Unterschiede in der Dicke der Oxidschicht des Kupfers und in der Oberflächenrauheit bestimmen die Absorptionseigenschaften des zu schweißenden Werkstoffs. Um reproduzierbare Schweißergebnisse (Schweißpunkttiefe und Fehlerfreiheit) zu erhalten, kommen im Wesentlichen folgende Techniken zur Anwendung.

Pulsformung

In der industriellen Praxis hat es sich bewährt, die Laserpulsleistung nicht konstant über die Zeit zu emittieren, sondern die abgegebene Leistung innerhalb der Periode eines Pulses zu variieren. Die „Pulsform“ wird materialspezifisch angepasst. Bei Reinkupfer und Bronze ist es beispielsweise üblich, die Leistung zu Beginn des Pulses langsam hochzufahren, dann sprunghaft auf ein hohes Leistungsplateau anzuheben und nach definierter Haltezeit wieder abzusenken. Bei Messing besteht die Gefahr der Zinkausdampfung und so ist ein kontinuierlicher Anstieg und Abfall der Laserleistung ohne Haltezeit empfehlenswert.

Laserstrahlschweißen mit Wellenlängen $< 1 \mu\text{m}$

Wie auch beim cw-Schweißen lassen sich durch die Verwendung von Lasern mit einer Wellenlänge im grünen und blauen Bereich des sichtbaren Lichts Vorteile bei der Prozessstabilität aufgrund der verbesserten Einkopplung erzielen. Die grüne Laserstrahlung reagiert deutlich unempfindlicher auf unterschiedliche Oberflächentopographien und leichte Schwankungen der Oxidschichtdicke als IR-Strahlung.

FAZIT:

Kupferwerkstoffe sind laserstrahlschweißgeeignet. Besonders zu achten ist dabei auf

- die starke Reflektivität gegenüber IR-Strahlung im festen Zustand, verbunden mit einem deutlichen Absorptionssprung beim Phasenwechsel fest-flüssig
- die besondere Eignung von Laserstrahlung im Wellenlängenbereich $< 1 \mu\text{m}$
- das unterschiedliche Schmelzbadverhalten bei Wärmeleitungs- und Tiefschweißen

3.3. Elektronenstrahlschweißen

Bei diesem Verfahren befinden sich die Fügepartner und der Elektronenstrahl im Vakuum. Trifft der gebündelte Strahl hochbeschleunigter Elektronen auf die Fügepartner, werden sie von deren Atomen abgelenkt und gestreut. Dabei wird ein Teil ihrer Bewegungsenergie in Wärme umgewandelt, welche der Aufschmelzung des Materials dient. Typischerweise dringen die Elektronen nur ca. 0,1 mm tief in das Material ein. Die exakte Eindringtiefe hängt von der Beschleunigungsspannung des Strahls und der Dichte des Werkstücks ab. Bei ausreichend hoher Energiedichte des Strahls sorgt die entstehende Wärme für eine Verdampfung des aufgeschmolzenen Materials und die Entstehung einer Dampfkapillare. Es kommt, ähnlich wie beim Laserstrahlschweißen, zur Entstehung des Tiefschweißeffekts, mit dessen Hilfe sich tiefe und schlanke Nähte erzeugen lassen (Abb. 9). Die Parameter Leistung, Vorschub und Defokussierung bestimmen, neben weiteren Parametern, auch bei diesem Verfahren die Nahttiefe und -breite wesentlich. Die Techniken der Leistungsmodulation und der Strahlpendingung können ebenso wie beim Laserstrahlschweißen angewandt werden, um die Nahtgeometrie zu variieren.

Das Elektronenstrahlschweißen ähnelt in vielerlei Hinsicht dem cw-Laserstrahlschweißen. Der Hauptvorteil des Verfahrens gegenüber dem Laser besteht darin, dass die Elektronen vom festen und flüssigen Grundwerkstoff zum überwiegenden Teil absorbiert werden. Somit sind mittels Elektronenstrahlschweißen in Kupfer auch sehr tiefe Nähte von bis zu 50 mm erzielbar. Ferner besteht die Möglichkeit, den Elektronenstrahl nahezu trägheitslos in seiner Position und Fokussierung durch magnetische Felder zu beeinflussen. So ist es möglich, mehrere Schweißnähte gleichzeitig zu erzeugen („Mehrbadtechnik“). Dies reduziert den Bauteilverzug deutlich.

Nachteil des Verfahrens ist, dass der Prozess nur im Vakuum stabil funktioniert. Die Arbeitskammer muss auf ca. bis 10^{-4} mbar evakuiert werden. Stöße mit Gasmolekülen würden die Elektronen ablenken und somit zu einer unerwünschten Defokussierung des Strahls führen. Je größer die zu schweißenden Bauteile sind, umso größer muss die Arbeitskammer gewählt werden. Damit steigen die zur Evakuierung nötige Zeit und auch die Kosten für eine leistungsfähigere Pumptechnik zur Vakuumerzeugung. Das Vakuum hat jedoch auch eine positive Nebenwirkung. Die Oxidation der Nahtoberfläche wird durch das Vakuum effektiv verhindert.

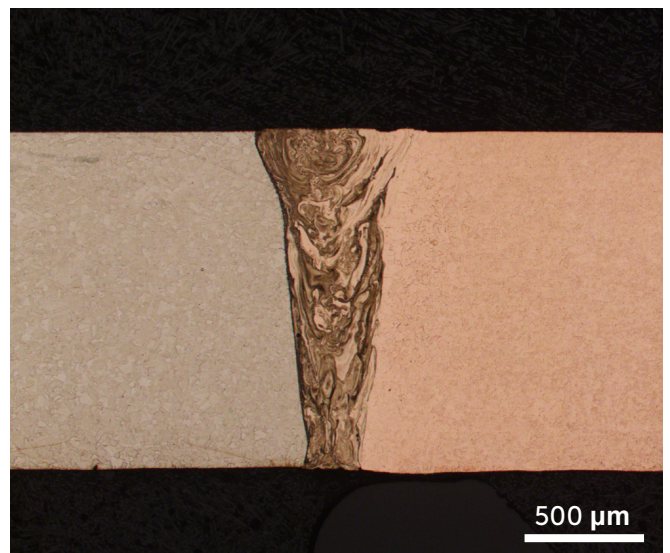


Abbildung 9 – Elektronenstrahlschweißnaht im I-Stoß zwischen Wieland-F12 und Wieland-K14 – Das Verfahren wird meist bei der Herstellung von Halbfabrikaten aus verschiedenen Kupferlegierungen verwendet.

Es existieren auch Anlagen, welche ohne Vakuum betrieben werden, sog. non-vac-Elektronenstrahlschweißanlagen. Aufgrund der Defokussierung des Elektronenstrahls lassen sich damit nur sehr flache und breite Nähte erzeugen. Zur Verhinderung der Oxidation der Nahtaupe muss ein Schutzgas verwendet werden (meist Helium).

FAZIT:

Kupferwerkstoffe sind elektronenstrahlschweißgeeignet. Besonders zu achten ist dabei auf

- die Notwendigkeit eines konstanten Vakuums zur Erzeugung qualitativ hochwertiger Nähte
- das unterschiedliche Schmelzbadverhalten bei Wärmeleitungs- und Tiefschweißen – analog zum cw-Laserstrahlschweißen

3.4. Schutzgasschweißen

Für Kupfer und Kupferlegierungen werden hauptsächlich die beiden Schutzgasschweißverfahren WIG- und MIG-Schweißen angewendet. Schutzgasschweißen führt zu hohem Wärmeeintrag in die Bauteile und somit zu starkem Verzug. Deshalb werden sie nur bei großflächigen Bauteilen und großen Blechdicken, insbesondere im Handwerk, eingesetzt. Das große Volumen der Bauteile, gepaart mit der hohen Wärmeleitfähigkeit von Kupfer, bedingt einen schnellen Wärmeabfluss und macht bei vielen Anwendungen ein Vorwärmen nötig.

WIG-Schweißen wird insbesondere bei Wandstärken < 10 mm eingesetzt. Bei größeren Blechdicken werden große Mengen an Zusatzwerkstoff benötigt, die nicht mehr mittels WIG-Schweißen, sondern nur mittels MIG-Schweißen schnell und wirtschaftlich ausgebracht werden können.

3.4.1. WIG-Schweißen

Beim WIG-Schweißen brennt der Lichtbogen zwischen einer nicht abschmelzenden Wolframelektrode und den Fügepartnern. Ein Zusatzwerkstoff kann zugeführt werden, muss aber nicht. Abb. 10 zeigt eine WIG-Naht, die ohne Zusatzwerkstoff erzeugt wurde.

Es kommen meist Schweißstromquellen mit fallender Charakteristik zum Einsatz. Gearbeitet wird vornehmlich mit Gleichstrom (bei Al-Bronzen und Cu-Zn-Legierungen mit Wechselstrom) und der als Minuspol geschalteten Elektrode. Als Elektroden werden fast immer thoriierte Wolframelektroden eingesetzt, deren Ende zur Formung des Lichtbogens angespitzt (schlanker Lichtbogen) oder rund angeschmolzen (breiter Lichtbogen) wird.

In der Praxis haben sich Argon, Helium und Argon-Helium-Gemische mit > 50 % Ar etabliert. Die Zündung des Lichtbogens erfolgt berührungslos mittels Hochspannungspuls oder berührend mit sehr geringer Stromstärke (Lift-Arc-Technik). Für Verbindungen von dünnwandigen Bauteilen und von Bauteilen mit unterschiedlicher Wärmeabfuhr (stark unterschiedliche Blechdicke und/oder Wärmeleitfähigkeit) eignet sich die Verwendung des WIG-Impulslichtbogens. Bei dieser Technik wird besonders wenig Energie ins Material eingebracht.

Eingesetzte Schutzgase sind Argon, Helium oder deren Gemische. In Argon, wegen dessen relativ niedriger Wärmeleitfähigkeit, zündet der Lichtbogen sehr leicht und es bildet sich ein weicher Lichtbogen mit geringer Energiedichte, was für dünnwandige Bauteile vorteilhaft ist. Helium besitzt eine ca. 10-mal höhere Wärmeleitfähigkeit und wird bei dickwandigen Bauteilen eingesetzt. Ferner kann durch Helium die Schweißgeschwindigkeit gesteigert werden. Durch das Schweißen mit Helium lassen sich tiefere Einbrände als mit Argon und porenärmere Nähte erzeugen. In der Praxis haben sich Helium-Argon-Gemische etabliert. Dies auch, da Argon gegenüber Helium einen deutlichen Preisvorteil bietet. In einigen Fällen werden auch Argon-Stickstoff-Gemische eingesetzt.

Ab Blechdicken ≥ 3 mm gilt: Bei steigender thermischer Leitfähigkeit des zu verschweißenden Materials ist Vorwärmen empfehlenswert. Bei Blechdicken > 7 mm werden sehr hohe Vorwärmtemperaturen von > 300 °C benötigt. Ab dieser Vorwärmtemperatur empfiehlt sich zusätzlich die Verwendung von Flussmitteln.



Abbildung 10 – WIG-Naht ohne Zusatzwerkstoff in Wieland-K65
WIG-Nähte werden meist zur Verbindung von Bändern als Transportnähte vor der Weiterverarbeitung verwendet und dienen so der Verminderung von Rüstzeiten und der Erhöhung der Produktivität beim Stanzen und Beschichten. Die Transportnähte werden nach den Stanz- bzw. Beschichtungsprozessen wieder entfernt. WIG-Schweißnähte werden kaum/nicht als Fügestellen in einer elektronischen Komponente selbst eingesetzt

3.4.2. MIG-Schweißen

Beim MIG-Schweißen brennt der Lichtbogen zwischen einer abschmelzenden Elektrode (Zusatzwerkstoff), welche automatisch und kontinuierlich nachgefördert wird, und den Fügepartnern. Es wird mit Gleichstrom und als Pluspol geschalteter Elektrode gearbeitet. Da durch den abschmelzenden Zusatzwerkstoff zusätzliche Wärme in die Fügezone eingebracht wird, ist eine Vorwärmung der Bauteile nur bei sehr dicken Wandstärken (> 10 mm) notwendig. Die Verwendung von Flussmitteln ist nicht notwendig.

Für Kupfer und Kupferlegierungen werden meist Impuls- und Sprühlichtbögen eingestellt, da sich diese Lichtbogentypen durch einen besonders feintropfigen

Werkstoffübergang und eine geringe Spritzerneigung auszeichnen. Als Schutzgase werden insbesondere Ar, He, oder Argon-Helium-Gemische mit > 50 % Argon eingesetzt.

Bei Sprühlichtbögen werden Argon-Stickstoff-Gemische mit < 30 % Stickstoff verwendet. Der Sprühlichtbogen wird für Füll- und Decklagen verwendet, da sich damit glatte Nahtraupen erzeugen lassen.

Beim Impulslichtbogen wird mit einem Impulsstrom gearbeitet, der den Grundstrom überlagert. Er wird insbesondere für das Schweißen in Zwangslagen und für Auftragsschweißungen auf Stähle genutzt.

3.4.3. Zusatzwerkstoffe für das Schutzgasschweißen

Zusatzwerkstoffe müssen je nach Art des zu verschweißenden Grundmaterials ausgewählt werden (Tabelle 1). In DIN EN 14640 sind die Zusatzwerkstoffe für das Verschweißen von Kupferlegierungen mittels

WIG-Schweißen (Blehdicken > 1,5 mm) und MIG-Schweißen (alle Band- bzw. Blehdicken) genormt. Bei Blehdicken < 1,5 mm wird das WIG-Verfahren ohne Zusatzwerkstoff angewendet.

Tabelle 1 – mögliche Zusatzwerkstoffe in Abhängigkeit des zu schweißenden Materials

Werkstoff der Fügepartner	Zusatzwerkstoff
Reinkupfer, CuFe2P, CuCrZr, CuNiSi	CuSn1, CuAg1
Zinnbronzen (Phosphorbronzen) CuSn4, CuSn5, CuSn6, CuSn8	CuSn6P, CuSn12P Überlegierten Zusatzwerkstoff verwenden
Kupfer-Nickel-Legierungen	CuNi10, CuNi30
Zn-haltige Legierungen (Messinge, Neusilber)	CuSn1, CuSn6P, CuSi3Mn1, CuAl8

FAZIT:

Kupferwerkstoffe sind schutzgasschweißgeeignet. Besonders zu achten ist dabei auf

- den starken Wärmeeintrag und den damit verbundenen Bauteilverzug sowie die eventuelle Notwendigkeit des Vorwärmens, je nach Bauteilvolumen und Wärmeleitfähigkeit des zu schweißenden Materials
- die Wirkung der unterschiedlichen Schutzgase
- die korrekte Auswahl der Zusatzwerkstoffe

3.5. Ultraschallschweißen

Im Gegensatz zu den bisher betrachteten Schweißverfahren wird beim Ultraschallschweißen keine Schmelze zur Herstellung einer stoffschlüssigen Verbindung zwischen den Fügepartnern gebildet (Schweißtemperatur $\ll$ Schmelztemperatur). Die Verbindung bildet sich aufgrund der Tatsache, dass die Bauteiloberflächen so nah in Kontakt gebracht werden, dass es zum Austausch von frei beweglichen Elektronen aus dem Elektronengas zwischen den metallischen Bauteilen kommt.

Um dies zu realisieren, müssen metallisch blanke Oberflächen auf einen Abstand von $< 200 \text{ nm}$ zusammengeführt werden. Dazu wird der untere Fügepartner fest eingespannt, während der obere Fügepartner von einem Schweißwerkzeug (Sonotrode), meist bestehend aus Stahl oder Titan, erfasst wird (Abb. 11). Die Sonotrode wird mit einer definierten Normalkraft auf das obere Bauteil aufgedrückt, wobei ihre geriffelte Struktur meist

Abdrücke im Bauteil hinterlässt (Abb. 12 a). Diese Struktur des Werkzeugs ist allerdings notwendig, um die von einem Ultraschallgenerator erzeugten und auf die Sonotrode überführten Schwingungen ideal auf das obere Bauteil zu übertragen. Es ergibt sich eine Relativbewegung zwischen beiden Bauteiloberflächen. Diese entspricht der Amplitude der Schwingungen und liegt im Bereich von $50 \text{ bis } 500 \mu\text{m}$. Durch die gleichzeitig wirkende Normalkraft werden dünne Verunreinigungsfilme teilweise aus der Fügezone verdrängt. Leichte Oxidschichten werden aufgebrochen und zu großen Teilen ebenfalls „herausgerieben“. Somit stehen sich punktuell blanke Metalloberflächen gegenüber, welche eine stoffschlüssige Verbindung eingehen („a-spots“). Der gesamte Vorgang dauert einige Millisekunden bis maximal 3 Sekunden. Die reale Anbindungsfläche über die a-spots ist folglich deutlich kleiner als die scheinbare Kontaktfläche, welche sich aus der Bauteil- und Stoßgeometrie ergibt.

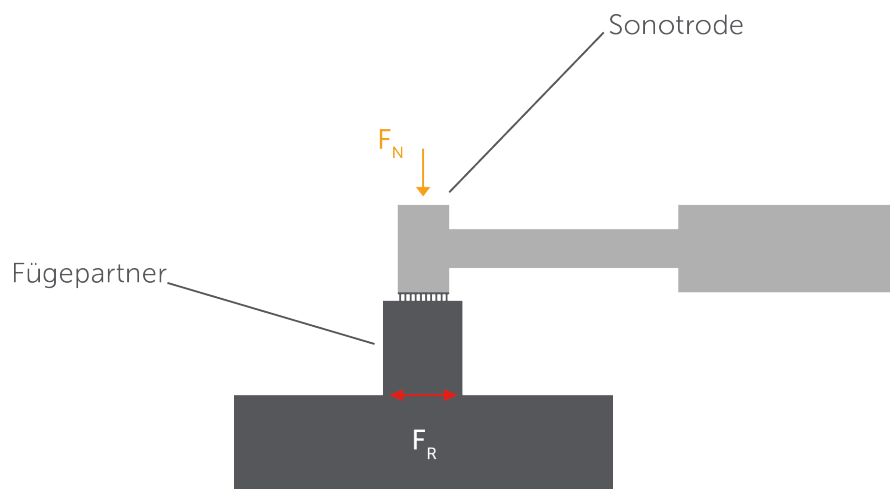


Abbildung 11 – Prinzipdarstellung des Ultraschallschweißens

Zur Erzeugung durchgängiger, linienförmiger Nähte dient das Ultraschallrollnahtschweißen. Bei dieser Verfahrensvariante ist die Sonotrode als Ring ausgeführt, drehbar gelagert und schwingt in Achsrichtung. Das Ultraschallschweißergebnis wird meist anhand der Verbindungsfestigkeit charakterisiert, bspw. mittels Abzugversuch. Neben den Maschinenparametern, wie Amplitude, Schweißenergie, Frequenz sowie Amboss- und Sonotrodengeometrie hängt das Ergebnis auch von den Eigenschaften der Fügeteile ab. Dies sind insbesondere die Rauheit, Oxidschichtbelegung, Verunreinigungen und Bauteilgeometrie. Weitere

Einflussparameter sind die Sonotrodenschwingrichtung relativ zur Walz-Bürststruktur des Bandes sowie die Positionierung der Fügepartner zueinander. Beides beeinflusst die Schwingungsverhältnisse im Gesamtsystem Maschine-Fügepartner und damit das Schweißergebnis.

Die vielseitigen und komplexen Zusammenhänge zwischen den maschinenseitigen und werkstoffseitigen Einflussparametern auf das Ultraschallschweißergebnis sind nach gegenwärtigem Stand der Technik noch nicht allumfassend verstanden und Gegenstand aktueller Forschungsprojekte.

In Wieland-internen Untersuchungen zum Ultraschallschweißen von Kupfer und Kupferlegierungen wurden folgende qualitative Zusammenhänge ermittelt:

- Die chemische Zusammensetzung des unbeschichteten Grundmaterials hat keine Auswirkungen auf das Ultraschallschweißergebnis.
- Eine Verschweißung zweier Fügepartner gelingt umso besser, je geringer der Härteunterschied zwischen den beiden Fügepartner-Werkstoffen ist.
- Eine geringe Rauheit der zu fügenden Oberflächen wirkt sich tendenziell günstig auf die Verbindungsbildung aus.
- Günstig ist ebenfalls die Ausrichtung der Sonotrodenschwingrichtung parallel zur Walz-Bürststruktur des Grundmaterials.
- Sichtbare Anlaufschichten, starke Verunreinigungen, weiche Oberflächenbeschichtungen wie Verzinnungen und ein großer Härteunterschied zwischen den Fügepartnern sind als kritisch zu bewerten.

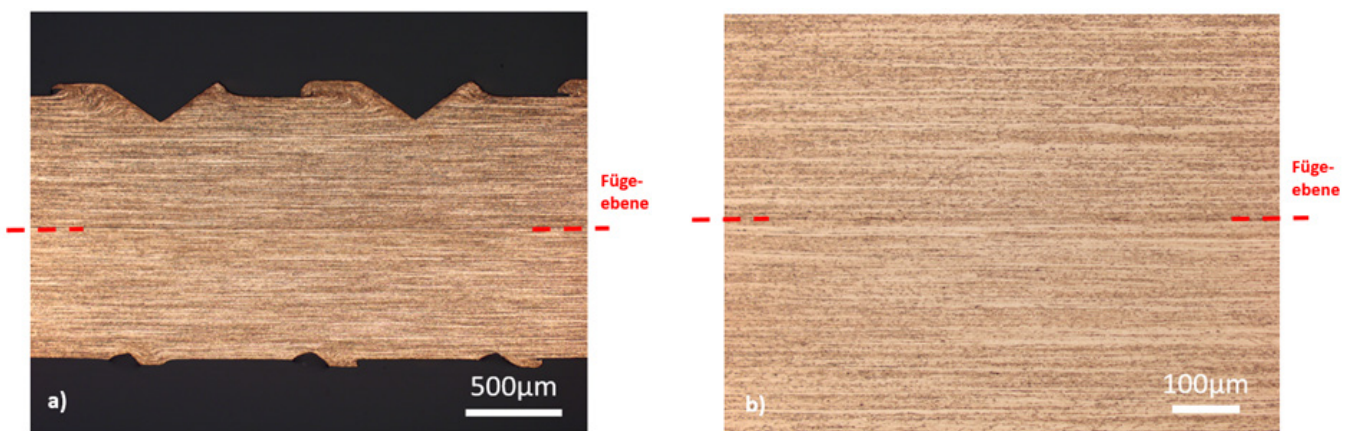


Abbildung 12 – Ultraschallschweißverbindung zwischen zwei Blechen aus Wieland-K75, Querschliffe im Lichtmikroskop, a) 50-fache Vergrößerung, Abdrücke der Sonotrode erkennbar, b) 200-fache Vergrößerung

FAZIT:

Kupferwerkstoffe sind ultraschallschweißgeeignet. Besonders zu achten ist dabei auf

- saubere und oxidfreie Bauteiloberflächen
- einen geringen Härtegradienten zwischen den zu fügenden Bauteiloberflächen
- eine Feinabstimmung zwischen Schweißparametern, Bauteilgeometrie und Oberflächeneigenschaften der Bauteile

4. Metallkundliche Aspekte beim Schmelzschweißen von Kupfer und Kupferlegierungen

4.1. Reinkupfer

Die größte Herausforderung beim Schweißen von Kupfer ist dessen hohe thermische Leitfähigkeit von 390 W/mK. Diese führt, unabhängig von der Art des Schmelzschweißverfahrens, zu einer sehr raschen Abfuhr der beim Schweißen entstehenden Wärme von der Schweißstelle. Es kommt somit zur Ausbildung von relativ geringen Einschweißiefen und breiten Wärmeeinflusszonen. Bei Schweißverfahren mit geringer Energiedichte (bspw. Lichtbogenschweißen) muss daher meist vorgewärmt werden. Bei den sehr energiedichten Schweißverfahren (Laser-, Elektronenstrahlschweißen) ist dies nicht nötig.

Beachtenswert ist der Umstand, dass die verschiedenen Phosphorgehalte in den unterschiedlichen Reinkupfersorten die elektrische (und damit auch thermische) Leitfähigkeit des Materials teils deutlich senken (Tabelle 2). Damit einher geht ein besseres Aufschmelzverhalten. Durch den steigenden Phosphorgehalt erhöht sich die Anfälligkeit des Materials für die Bildung von Poren in leichtem Maße.

Sauerstoffhaltiges Kupfer (Cu-ETP) wird für Schmelzschweißanwendungen nicht empfohlen, da aufgrund des als Kupferoxydul an den Korngrenzen gebundenen Sauerstoffs stets die Gefahr des Ausbruchs der Wasserstoffkrankheit besteht. Wasserstoff kann bei Temperaturen von $> 500\text{ °C}$ leicht in Kupfer eindiffundieren. Bei der Wasserstoffkrankheit reagiert Wasserstoff aus der Atmosphäre mit dem Kupferoxydul unter Volumenexpansion zu Wasserdampf. Es kommt zu einer charakteristischen Bläschenbildung an den Korngrenzen und schließlich zum Aufreißen derselben (Abb. 13). Um zu prüfen, ob eine Schweißnaht Kupferoxydul enthält und somit für die Wasserstoffkrankheit anfällig ist, kann ein metallographischer Schliff der Naht ungeätzt

unter Dunkelfeldbeleuchtung betrachtet werden. Das Kupferoxydul fällt hierbei durch seine typische rubinrote Farbe auf (Abb. 14). Prinzipiell steigt die Gefahr der Sauerstoffanreicherung der Schweißnaht mit der Schweißzeit und der Schmelzbadgröße. Beim Schutzgasschweißen ist eine ausreichende Schutzgasabdeckung auch aus diesem Grunde essentiell.

Die Kupferschmelze ist sehr niedrigviskos. Auf ein Schweißen in Zwangslagen sollte daher verzichtet werden. Auch in Wannenlage führt die geringe Schmelzeviskosität zu starker Schmelzbaddynamik und somit häufig zu Spritzern.

Das typische Gefüge einer schmelzgeschweißten Kupferschweißnaht ist relativ grobkörnig und weich, verglichen mit dem Ausgangsgefüge. In Abhängigkeit von der Schmelzbadgröße sowie der Wärmeabfuhr und somit von der Abkühlgeschwindigkeit, stellt sich ein mehr oder weniger stängeliges, epitaktisch gewachsenes Nahtgefüge ein. Wird jedoch extrem schnell abgekühlt, sodass homogene Keimbildung stattfindet und eine sehr feine Erstarrungsstruktur entsteht, fällt die Erweichung geringer aus und es kann sich sogar eine Aufhärtung ergeben, da die zahlreichen Korngrenzen und Gitterstörungen die Beweglichkeit von Versetzungen behindern. In der Wärmeeinflusszone rekristallisiert das Korn mehr oder minder stark in Abhängigkeit des Umformgrades des Ausgangsmaterials. Höhere Umformgrade und damit höhere Defektdichten im Kristallgitter führen dabei zu einer höheren Rekristallisationsneigung, ausgeprägter Erweichung und breiten Wärmeeinflusszonen.

Tabelle 2 – elektrische Leitfähigkeit verschiedener Reinkupfersorten im weichgeglühten Zustand

	Cu-OFE	Cu-OF	Cu-PHC	Cu-ETP (E-Cu)	Cu-HCP (SE-Cu)	Cu-DLP	Cu-DHP (SF-Cu)
elektrische Leitfähigkeit (MS/m)	58,6	58,0	58,0	58,0	57,0	52	46
O-Gehalt (ppm)				50–400			
P-Gehalt (ppm)			30		30–40	50–120	150–400

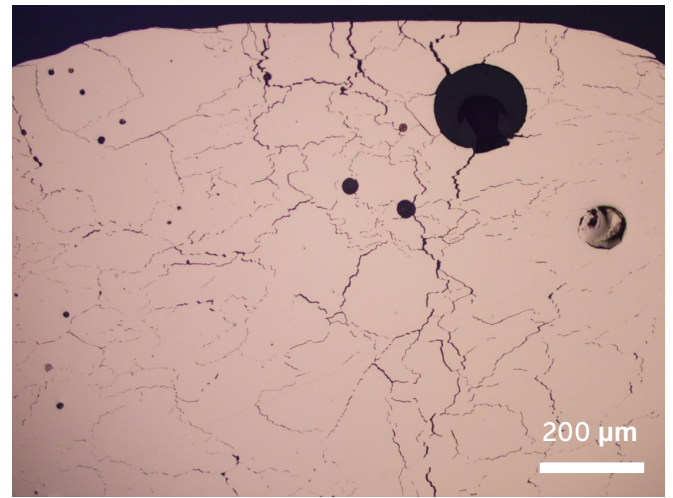
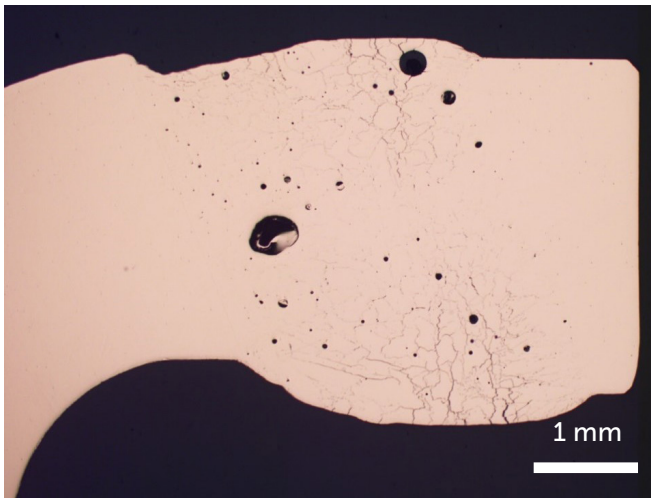


Abbildung 13 – Korngrenzenrisse nach ausgebrochener Wasserstoffkrankheit

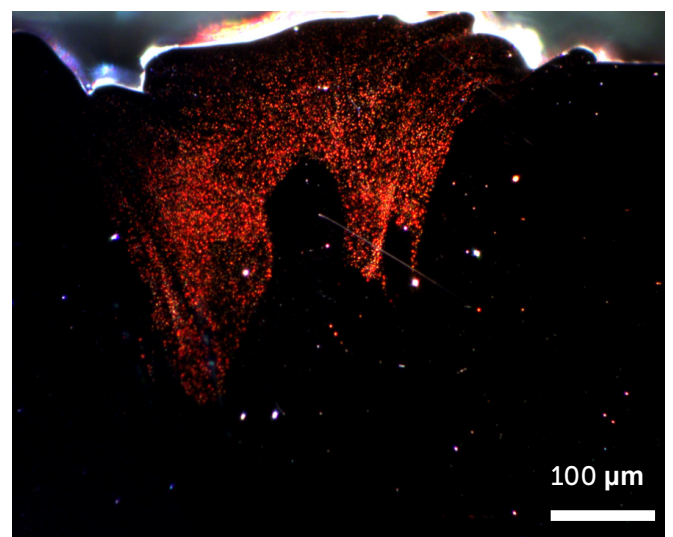
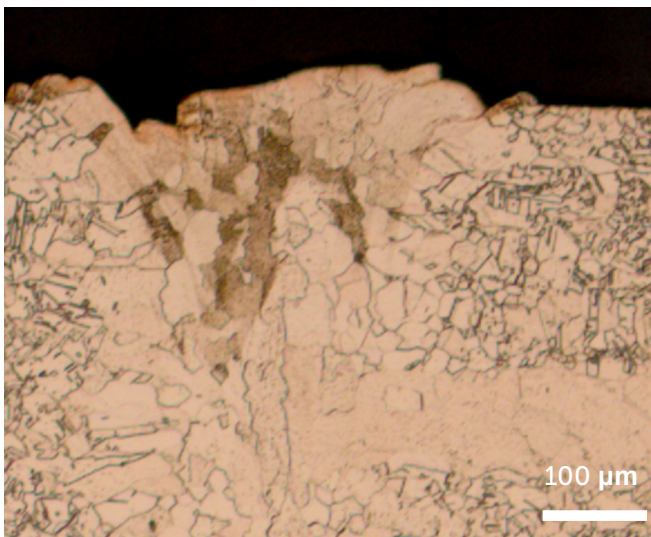


Abbildung 14 – Schweißnaht mit Kupferoxydul unter Hellfeldbeleuchtung (links) und Dunkelfeldbeleuchtung (rechts)

4.2. Ausscheidungshärtende Kupferlegierungen

Unter den Kupferlegierungen existieren zahlreiche niedriglegierte Systeme, welche ihre überlegenen Festigkeitseigenschaften bei gleichzeitig guter elektrischer Leitfähigkeit durch die definierte Bildung von Ausscheidungen erzielen. Diese festigkeitsbildenden Ausscheidungen werden durch Schmelzschweißverfahren im Bereich der Schweißnaht teilweise oder vollständig aufgelöst, sodass es zu sehr starken Härteabfällen in diesem Bereich kommt (Abb. 15).

Das Nahtgefüge ist bei diesen Legierungen ebenso von Grobkorn geprägt wie bei schmelzgeschweißtem Reinkupfer. Hierdurch ist die Naht einerseits gut umformbar, jedoch mechanisch nicht so hoch belastbar wie das Ausgangsgefüge. Bei der Konstruktion von geschweißten Komponenten aus ausscheidungsgehärteten Kupferlegierungen sollte folglich besonderes Augenmerk darauf gelegt werden, dass die Schweißnähte in mechanisch möglichst gering belastete Bereiche gelegt werden. Durch die

Auflösung von Ausscheidungen kann sich außerdem lokal der spezifische elektrische Widerstand des Materials geringfügig erhöhen. Die Wärmeeinflusszone fällt meist schmäler aus als bei Schmelzschweißungen in Reinkupfer, da das niedriglegierte Kupfer eine geringere Wärmeleitfähigkeit besitzt und sich eher ein leichter Wärmestau bildet. Ferner hängt die Rekristallisationsneigung stets mit dem Grad der Kaltverfestigung zusammen. Dieser ist beim niedriglegierten Kupfer zwar höher als beim Reinkupfer, jedoch behindern die Ausscheidungsteilchen die Korngrenzenmigration und reduzieren so die Rekristallisationsneigung des Gefüges. Ausscheidungen in der Wärmeeinflusszone können sich vergrößern und so lokal die Gefügefestigkeit senken.

Beim Widerstandsschweißen sollte lediglich verzinnertes Material verschweißt werden, da Ausscheidungen an den Elektroden anhaften und so deren Standzeit reduzieren können.

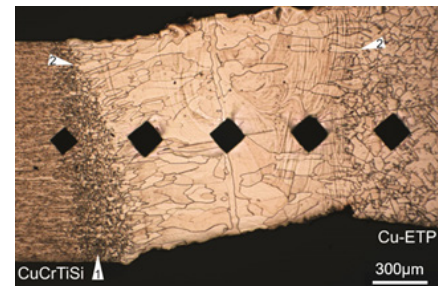
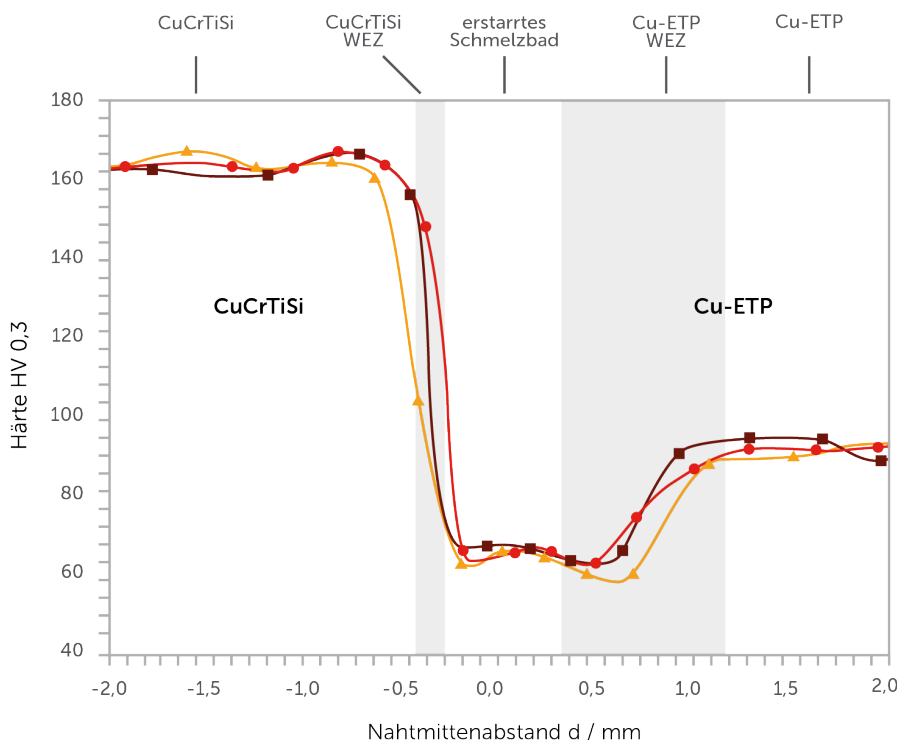


Abbildung 15 – I-Naht zwischen Wieland-K75 und Wieland-K32 – im Härteprofil werden der signifikante Härteabfall im Bereich der Schweißnaht und die unterschiedliche Breite der Wärmeeinflusszonen deutlich.

4.3. Zinnbronze

Vorbemerkung 1: Zinnbronzen werden häufig als „Phosphorbronzen“ bezeichnet.

Vorbemerkung 2: Dieses Kapitel schließt den Werkstoff CuSn0,15 (C14415, Wieland-K81) mit ein, da dies aus werkstofftechnischer Sicht eine sehr niedrig legierte Zinnbronze ist.

4.3.1 Schweißnahtausbildung

Mit steigendem Zinngehalt im Kupfer nimmt die thermische Leitfähigkeit der Zinnbronze signifikant ab (Abb. 16). Die Aufschmelzbarkeit des Materials verbessert sich mit abnehmender Leitfähigkeit und es kann problemlos ein stabiles Schmelzbad erzeugt

werden. Charakteristisch für Schweißnähte in Bronze sind daher verhältnismäßig große Schmelzbäder und schmale Wärmeeinflusszonen, beides im Vergleich zu Schweißnähten an Reinkupfer gesehen.

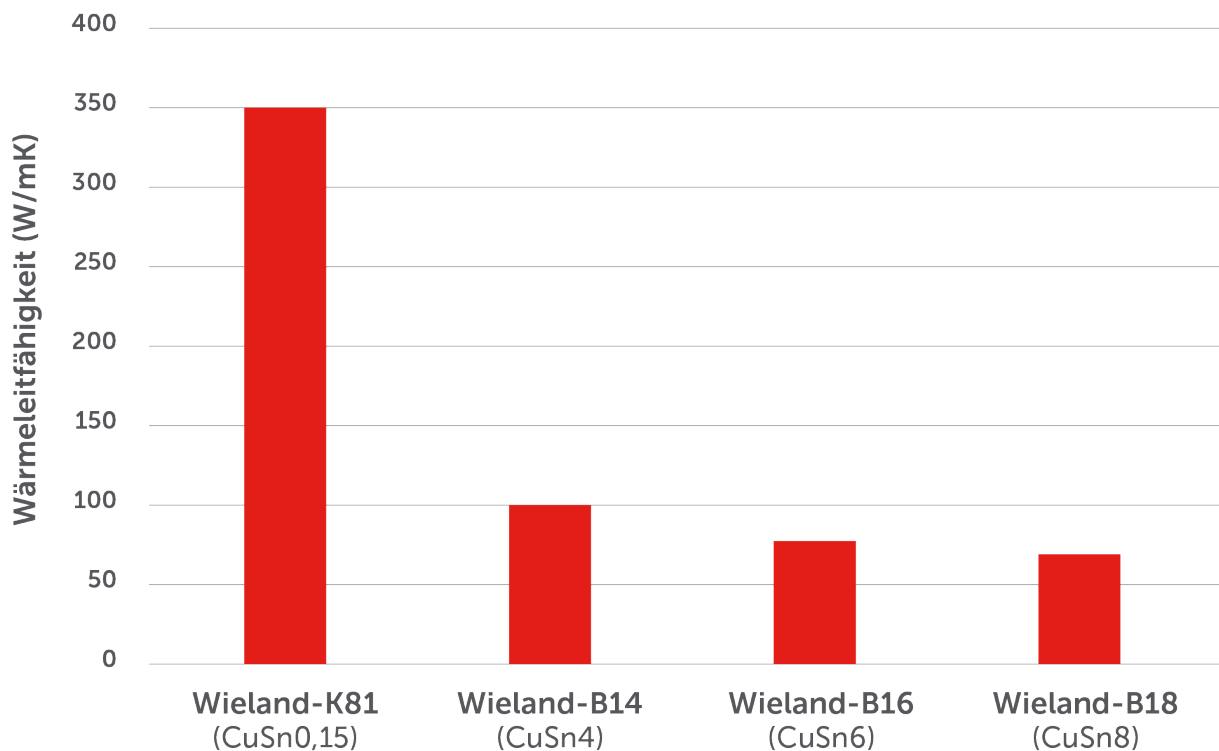


Abbildung 16 – thermische Leitfähigkeit von Zinnbronzen mit steigendem Zinngehalt

4.3.2 Mikrostrukturelle Vorgänge

Das große Erstarrungsintervall im binären System Cu-Sn (Abb. 17) ist beim Schweißen ursächlich für die Bildung von Dendriten und das Auftreten von Mikro-seigerungen. Zu Beginn der Erstarrung bildet sich im Schweißnahtgefüge zunächst ein zinnarmer Mischkristall. Mit dessen Wachstum wird die Restschmelze mit Zinn aufkonzentriert. Verunreinigungen und Fremdelemente werden vor der Erstarrungsfront hergeschoben und reichern sich im interdendritischen Raum an. Aufgrund des hohen Sn-Gehaltes kann sich hier die intermetallische β -Phase bilden, welche bei weiterer Abkühlung über die γ -Phase in die δ -Phase ($\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$) umwandelt. Schlussendlich ist der interdendritische Raum gekennzeichnet durch eine von den Dendritenarmen abweichende chemische Zusammensetzung, einen relativ hohen Gehalt an Verunreinigungen und eventuellen Fremdphasen, die spröde δ -Phase und eine erhöhte Defektdichte des Kristallgitters. Diese Effekte, welche mit dem Zinngehalt zunehmen, bewirken eine Erhöhung der Härte des Schweißnahtgefüges im Vergleich zum durch Rekristallisation und Erholung erweichten Gefüge der Wärmeeinflusszone (WEZ).

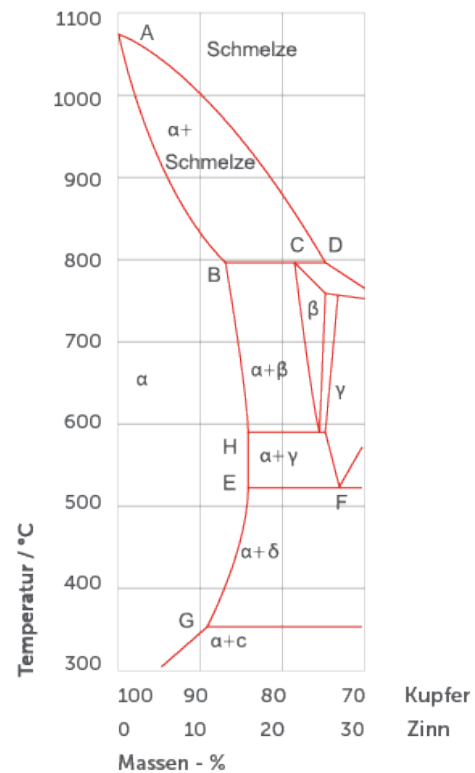


Abbildung 17 – kupferhaltige Seite des Phasendiagramms Cu-Sn (nach G.V. Raynor, Ann. Equilib. Diagrams No.2, London 1949)

4.3.3 Heißbrissanfälligkeit

Ferner beeinflussen diese Effekte die Heißbrissanfälligkeit des Schweißgutes. Diese steigt mit steigendem Zinngehalt der Bronze zunächst an, erreicht bei ca. 2 % Zinn ihr Maximum und nimmt mit weiter steigendem Zinngehalt wieder ab (Abb. 18). Durch die Anreicherung des niedrigschmelzenden Zinns und Verunreinigungen im interdendritischen Raum verbleibt dort für eine

relativ lange Zeit eine Flüssigphase. Diese kann durch, beim Erstarrungsvorgang auftretende, Spannungen leicht aufgerissen werden – der typische Heißbrissmechanismus. Ab Zinngehalten von deutlich > 2 % nimmt die Heißbrissneigung ab, da der interdendritische Raum immer fester wird. Grund hierfür ist die Entstehung einer harten zweiten Phase.

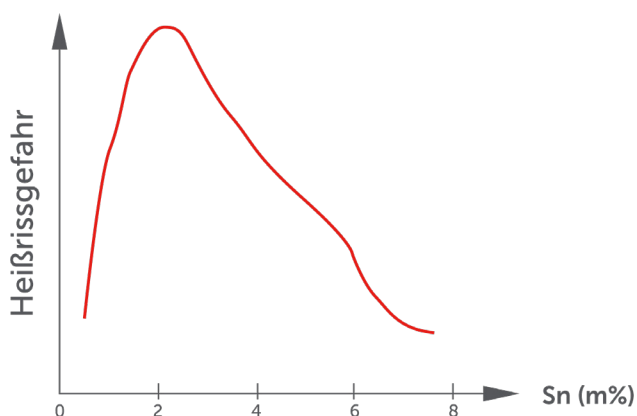


Abbildung 18 – qualitativer Zusammenhang zwischen dem Zinngehalt in einer Bronze und der Heißbrissgefahr beim Schmelzschweißen

Werden Zinnbronzen wie Wieland-K81 (CuSn0,15) und Wieland-B16 (CuSn6) jeweils artgleich verschweißt, besteht folglich kein ernsthaftes Heißbrissrisiko. Wird jedoch bspw. eine Mischverbindung aus Wieland-B16 und Wieland-K81 oder Reinkupfer hergestellt, kann sich in der Mischzone der Schweißnaht ein Zinngehalt

nahe des kritischen Bereichs einstellen. Ob tatsächlich Heißrisse auftreten hängt neben der Blechdicke ferner jedoch auch vom Gesamtenergieeintrag (Schweißnahtvolumen) und der daraus resultierenden Abkühlgeschwindigkeit ab.

4.3.4 Einfluss des Phosphorgehaltes / der Abgusstechnik

Mittels Bandguss gegossene Bronzen besitzen einen höheren Gehalt an Phosphor, da dieser die Schmelzeviskosität senkt und damit den Bandguss erst möglich macht. Mittels Brammenguss gegossene Bronzen benötigen diesen Phosphorgehalt nicht. Durch das Weglassen des Phosphors im Brammenguss lassen sich Bronzebänder mit höheren Leitfähigkeiten herstellen.

Der Phosphorgehalt der Zinnbronze wirkt sich ferner auf ihre Schweißeignung aus.

Phosphor steigert die Heißbrissanfälligkeit beim Schweißen durch Bildung niedrigschmelzender Phasen an den Korngrenzen. Cu-Sn-Legierungen, welche mittels Brammenguss hergestellt werden, sind also besser schweißgeeignet.

4.4 Cu-Zn-Legierungen

Aufgrund der geringen Verdampfungstemperatur von Zink (907 °C) neigen Cu-Zn-Legierungen beim Schmelzschweißen zu starken Ausdampfungen, welche mit erhöhter Porigkeit, starker Spritzerbildung und teilweise explosionsartigen Schmelzeauswürfen einhergehen. Die Schweißraupen sind häufig stark zerklüftet (Abb. 19). Mit steigendem Zinkgehalt nehmen die Intensität und Häufigkeit dieser Nahtunregelmäßigkeiten zu.

Beim Schmelzschweißen von Cu-Zn-Legierungen sollte der Wärmeeintrag in das Bauteil so gering wie möglich gehalten werden (bspw. durch geringe Stromstärke bzw. Strahlleistung und hohe Vorschubgeschwindigkeit). Beim Schutzgasschweißen sollte mit Wechselstrom gearbeitet werden, da sich das Schmelzbad unter Verwendung von Gleichstrom stärker aufheizt.

Beim Laser- und Elektronenstrahlschweißen wird mit sehr hoher Energiedichte gearbeitet. Zwar ist der Gesamtenergieeintrag in das Bauteil bei diesen Verfahren gering, der lokale Energieeintrag jedoch sehr hoch, was beim Tiefschweißen von Messing zu heftigen Schmelzeauswürfen führt. Um die Nahtraupe anschließend zu glätten und somit auch die Nahtfestigkeit zu erhöhen,

kann mit einem stark defokussierten Strahl die Nahtraupe erneut aufgeschmolzen werden.

Bleihaltige Messinge neigen aufgrund des geringen Schmelzpunktes von Blei (327 °C) neben den starken Zinkabdampfungen zur Heißrissbildung. Schmelzschweißungen an diesen Werkstoffen sollten vermieden werden.

Das Sondermessing Wieland-S12 (CuSn3Zn9) ist aufgrund des relativ geringen Zinkgehalts noch als schweißgeeignet einzuschätzen.

Beim Verschweißen der zinkhaltigen Mn-Bronze Wieland-FX9 (CuMn15Zn15Al1) wirkt sich die desoxidierende Wirkung des Elements Mangan prinzipiell positiv auf den Schmelzfluss aus. Allerdings dominieren auch bei dieser Legierung die negativen Auswirkungen der Zinkausdampfungen.

Allgemein lässt sich aussagen, dass die genannten Cu-Zn-Legierungen weniger gut strahlschweißgeeignet sind. Dagegen ist die Verwendung von Widerstandsschweißen, Pressschweiß- und Lötverfahren eher zu empfehlen.

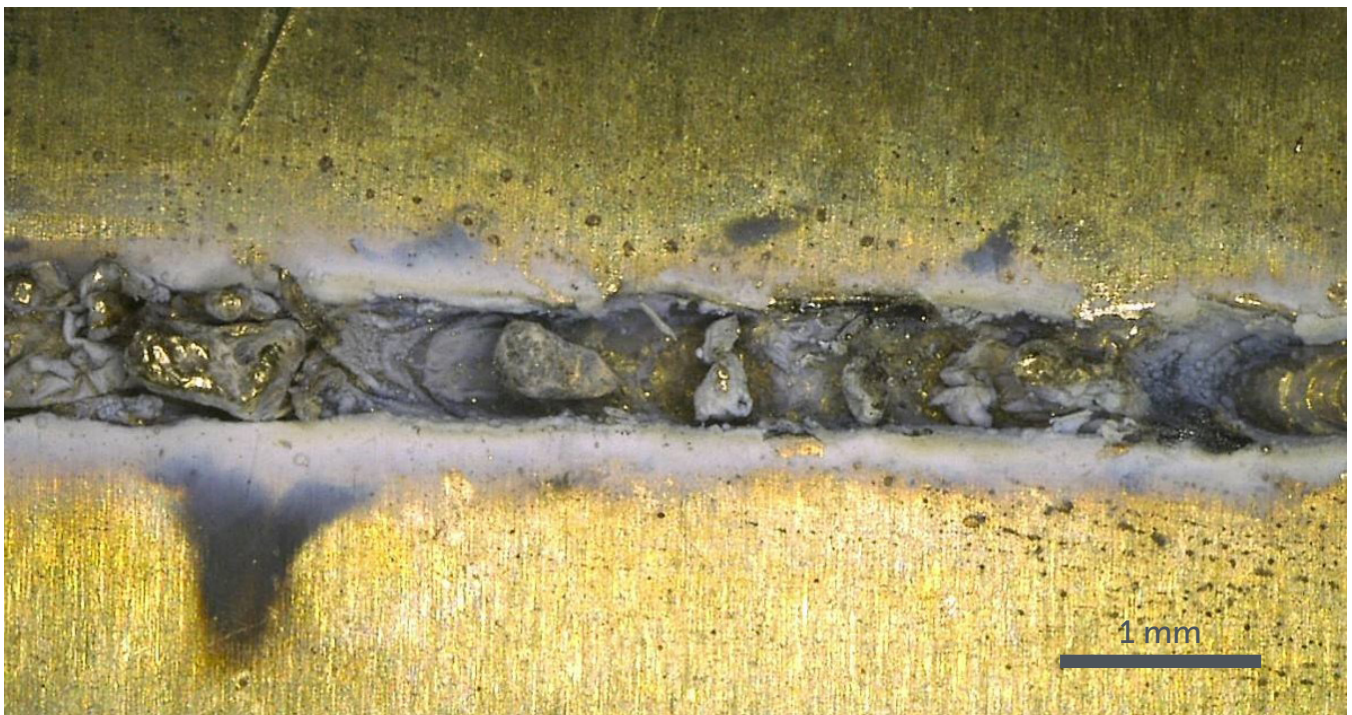


Abbildung 19 – Laserschweißnaht in CuZn37

4.5. Cu-Ni-Legierungen und Neusilber

Kupfer und Nickel bilden eine lückenlose Mischkristallreihe und es treten keine störenden zweiten Phasen auf. Ferner ist die Wärmeleitfähigkeit von Cu-Ni-Legierungen deutlich geringer als beim Reinkupfer, was zu einer guten Aufschmelzbarkeit und einem stabilen Schmelzbad führt. Die Schweißbeignung reiner Cu-Ni-Legierungen ist folglich als hervorragend einzustufen.

Mit zunehmendem Nickelgehalt steigt die Löslichkeit für Wasserstoff in der Cu-Ni-Schmelze, was zu einer erhöhten Porigkeit führt. Generell sollte daher auf eine hohe Sauberkeit der Bauteile geachtet werden. Beim Schutzgasschweißen ist die Schutzgasabdeckung von Lichtbogen und Schmelze besonders wichtig. Außerdem sollte die Oxidschicht vor dem Schweißen

durch Schleifen oder Ätzen beseitigt werden, da sich sonst zähflüssige Schlacken aus Nickeloxiden bilden könnten, die den Schweißvorgang stark beeinträchtigen könnten.

Kupfer-Nickel-Legierungen, die zusätzlich Zinn enthalten, so wie Wieland-L49 (CuNi9Sn2), neigen zur Bildung niedrigschmelzender Phasen und somit zu Heißrissen.

Für Cu-Ni-Zn-Legierungen (Neusilber) gelten zusätzlich die Besonderheiten, welche beim Schweißen von Cu-Zn-Legierungen zu beachten sind. Die Problematik der Zinkabdampfung ist hierbei ausgeprägter als bei Messing, da das Zink in der Cu-Ni-Matrix schlechter gebunden ist als in einer Cu-Matrix.

Weiterführende Informationen zu Kupferlegierungen sind in der Wieland-Broschüre „Bänder für Steckverbinder“ erhältlich.

5. Hinweise zu metallischen Beschichtungen und Benzotriazol

Metallische Beschichtungen werden auf Bänder aus Kupfer und Kupferlegierungen aufgebracht, um deren Gebrauchseigenschaften in vielfältiger Weise zu verbessern bspw. Kontakteigenschaften für Steckverbinder und Korrosionseigenschaften.

Die Beschichtungen beeinflussen allerdings auch die Schweißseignung der Fügepartner. Auf die wichtigsten Beschichtungsarten und deren Einfluss beim Schweißen wird im Folgenden kurz eingegangen.

5.1. Zinn

Die sehr weiche und niedrigschmelzende Zinnbeschichtung ist die in der Elektrotechnik am häufigsten verwendete Art des metallischen Überzugs für Kupfer und Kupferlegierungen und findet insbesondere bei Steckverbindern Anwendung. Die mittels Feuerverzinnung aufgebrachte Zinnschicht bildet bereits während ihrer Erzeugung eine intermetallische Phase (IMP) zwischen freiem Zinn an der Oberfläche und dem Grundmaterial aus, welche einen effektiven

Beitrag zur Verhinderung von Whiskerwachstum leistet (Wieland SnPUR®). Diese IMP kann durch nachgelagerte Wärmebehandlung durchwachsen um die Schichthärte zu steigern (Wieland SnTEM®). Ferner können Legierungselemente zum schmelzflüssigen Zinn vor der Feuerverzinnung hinzugegeben werden, um die Temperaturbeständigkeit der Beschichtung zu verbessern (Ag in Wieland SnTOP®).

Weiterführende Informationen hierzu sind in der Wieland-Broschüre „Feuerverzinnte Bänder aus Kupferwerkstoffen“ erhältlich.

Alternativ kann Zinn auch galvanisch aufgebracht werden, wobei eine nachgelagerte Reflow-Behandlung die IMP-Bildung herbeiführt. Feuerverzinnte und galvanische Zinn-Reflow-Beschichtungen beeinflussen Schweißprozesse in gleicher Art und Weise.

Beim Laser-, Elektronenstrahl- und Lichtbogen-schweißen von verzinnten Materialien muss die mögliche Aufmischung des Schmelzbades mit Zinn aus der Zinnschicht beachtet werden. Diese kann dazu führen, dass sich Zinn in Schlieren in die Naht zieht (Abb. 20) und so zu einer mechanischen Schwachstelle führt. Bei hohen Streckenenergien kann es lokal zum Auflegieren (Bildung von Bronze) kommen. Der hohe Absorptionsgrad des festen Zinns

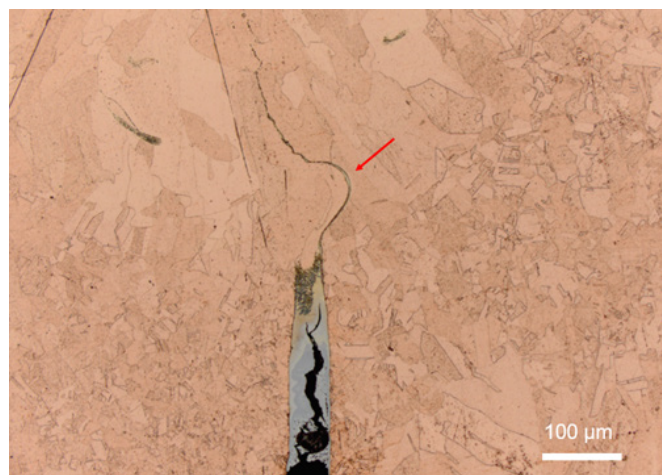


Abbildung 20 – Zinnschlieren in einer Nahtwurzel beim Verschweißen von verzinntem Reinkupfer

von ca. 45 % gegenüber IR-Strahlung erleichtert beim Laserstrahlschweißen mit IR-Strahlung deutlich die Einkopplung des Laserstrahls.

Beim Widerstandsschweißen bietet die Zinnschicht durchaus Vorteile. Ihre geringe Härte führt zu einer Vergrößerung der realen Kontaktfläche in den Ebenen Elektrode-Blech und Blech-Blech. Infolgedessen wird die Gefahr lokaler Hotspot- und Spritzerbildung verringert. Eine Auflegierung der Schweißnaht ist nicht zu erwarten, da das Zinn verfahrensbedingt aus der Fügezone herausgedrückt wird (vgl. Kap. 3.1).

5.2. Nickel

Die wichtigsten Beschichtungen auf Nickelbasis sind der galvanisch aufgetragene Rein-Nickelüberzug (Schmelztemperatur: 1.453 °C) und der mit Phosphor legierte, chemische Nickelüberzug (Schmelztemperatur bei 11 % P-Anteil ca. 900 °C).

Aufgrund der hohen Schmelztemperatur von Nickel treten Aufmischungen der Nickelschicht mit dem Schmelzbad nur selten auf, sind aber bei Laser-, Elektronenstrahl- und Schutzgasschweißen nicht ausgeschlossen. Da Kupfer und Nickel eine lückenlose Mischkristallreihe bilden, sind Aufmischungen mechanisch unkritisch, die elektrische Leitfähigkeit des Materials wird hierdurch jedoch lokal gesenkt. Der Absorptionsgrad des festen Nickels für IR-Strahlung ist mit ca. 26 % höher als bei Kupfer und erleichtert somit die Einkopplung des Strahls beim Laserstrahlschweißen.

Zu bedenken ist, dass es an der Kontaktstelle Elektrode-Blech aufgrund des sehr geringen Schmelzpunktes von Zinn (232 °C) und abhängig von Elektroden-/ Bauteildesign sowie von der Stromstärke zur Zerstörung der Beschichtung bzw. lokaler Schichtdickenreduzierung kommen kann.

Beim Ultraschallschweißen verzinnter Materialien kann, auch bei durchgetemperten Zinnschichten, eine Schmierwirkung eintreten. Diese äußert sich in längeren Schweißzeiten und geringeren Nahtfestigkeiten.

Beim Widerstandsschweißen kann galvanisch Nickel zu Problemen führen. Ist das Grundmaterial bereits aufgeschmolzen, aber der hochschmelzende Nickelüberzug noch nicht, wirkt er wie eine trennende Membran und verhindert die Verbindungsbildung zwischen den Fügepartnern. Wird die Schicht durch die Nachsetzbewegung der Elektroden zerstört, während das Grundmaterial aufgeschmolzen ist, wird schlagartig Schmelze freigesetzt, was zu starker Spritzerbildung führt. Nicht aufgeschmolzene Nickelschichten in Widerstandsschweißnähten können ferner mechanische Schwachstellen der Verbindung darstellen. Bei chemisch Nickel bestehen die beschriebenen Probleme mehrheitlich nicht, da dessen Schmelzpunkt mit ca. 900 °C leicht unterhalb dem des Kupfers liegt.

5.3. Silber

Der Schmelzpunkt des Silbers liegt mit ca. 962 °C etwas unterhalb des Schmelzpunktes von Kupfer (1.084 °C). Das binäre System Kupfer-Silber ist ein klassisches System mit begrenzter Löslichkeit im festen Zustand. Aufmischungen von Silber und Kupfer in einer Schmelzschweißnaht führen folglich zur Bildung eines eutektischen Nahtgefüges und lokalen Mischkristallgebieten mit hoher Kupfer- bzw. Silberkonzentration. Ein solches Nahtgefüge weist eine gute Festigkeit und Zähigkeit auf, jedoch wird hierdurch auch lokal der spezifische elektrische Widerstand des Gefüges etwas erhöht. Der Absorptionsgrad von Silber gegenüber IR-Strahlung beträgt nur ca. 4 % und ist damit sehr ähnlich dem des festen Kupfers. Deshalb wirkt sich eine Silberbeschichtung nicht auf das Einkoppelverhalten des IR-Laserstrahls beim Laserstrahlschweißen aus.

Das Widerstandsschweißen wird durch die Silberbeschichtung aufgrund des zum Kupfer ähnlichen Schmelzpunkts nur unmerklich beeinflusst. Die Beschichtung wird (wie bei Zinnbeschichtungen), bei entsprechender Prozessführung, aus der Fügezone an den Rand verdrängt. Ferner bleibt die Beschichtung an der Berührfläche Elektrode-Blech weitgehend intakt.

Auf Silberschichten häufig aufgebrachte Thiopassivierungen erzeugen erfahrungsgemäß keine negativen Effekte auf den Schweißprozess.

5.4. Temporärer Korrosionsinhibitor Benzotriazol

Benzotriazol (BTA) ist bei Halbfabrikaten aus Kupfer und Kupferlegierungen ein standardmäßig angewandter temporärer Korrosionsinhibitor. Er wird in Form einer wässrigen Lösung auf die Bandoberfläche aufgebracht und liegt anschließend dort in einer Monolage chemisorbiert vor. BTA schützt den Grundwerkstoff einige Monate vor atmosphärischer Oxidation (Zeitdauer abhängig von der Legierung und den Lagerbedingungen).

Es sind keine nachgewiesenen positiven oder negativen Auswirkungen von BTA-Monolagen auf die Eignung von Kupfer und Kupferlegierungen zum Widerstands-, Laser-, Elektronenstrahl-, Schutzgas- und Ultraschallschweißen bekannt.

Weiterführende Informationen hierzu sind in der Wieland-Broschüre „Band aus Kupfer und Kupferlegierungen - Lagerfähigkeit, Lötbarkeit und Anlaufbeständigkeit“ erhältlich.

wieland

Wieland-Werke AG | Graf-Arco-Straße 36 | 89079 Ulm | Deutschland
info@wieland.com | wieland.com

Diese Drucksache unterliegt keinem Änderungsdienst. Abgesehen von Vorsatz oder grober Fahrlässigkeit übernehmen wir für ihre inhaltliche Richtigkeit keine Haftung.
Die Produkteigenschaften gelten als nicht zugesichert und ersetzen keine Beratung durch unsere Experten.



09/2021_RPTMA_UL/SK/01/MC-ED/UL/AIT