

Das folgende Beiblatt befasst sich mit dem Laserstrahlschweißen von Kupfer und Kupferlegierungen mit einer Laserleistung größer als 400 W (nicht im Mikrobereich).

Aufgrund der guten Reflexionseigenschaften von Kupfer besteht bei einer Defokussierung des Laserstrahls die Gefahr, dass Resonator-komponenten und/oder die Peripherie beschädigt werden.

#### Inhalt:

- 1 Kupfer und niedriglegierte Kupferlegierungen
- 2 Kupferlegierungen
- 3 Festkörperlaser
  - 3.1 Faserlaser
  - 3.2 Scheibenlaser
  - 3.3 Grüner Laser
- 4 Gaslaser
  - 4.1 CO<sub>2</sub>-Laser
- 5 Schrifttum

### 1 Kupfer und niedriglegierte Kupferlegierungen

#### Wechselwirkung Werkstoff und Laserstrahl:

Reines Kupfer hat gegenüber Stahl eine sehr viel höhere Wärmeleitfähigkeit. Sie beträgt bei Raumtemperatur ca. 394 W/(mK) und ist somit sechs Mal höher als von unlegiertem Stahl. Bei 1000°C ist die Wärmeleitfähigkeit bereits 15-mal höher. Aufgrund dieser Materialeigenschaft wird die aufgebrachte Schweißwärme sehr schnell in den umliegenden Werkstoff abgeleitet und steht somit dem eigentlichen Schweißprozess in der Wechselwirkungszone zwischen Laser und Werkstoff nicht mehr zur Verfügung [1]. Die Wärmeausdehnung von Kupfer ist ungefähr 50% höher im Vergleich zu Stahl, wohingegen sie 30% geringer ist als bei Aluminium [2].

Beim Auftreffen des Laserstrahls auf Kupfer wird ein Teil der Strahlung reflektiert und ein anderer Teil vom Werkstück absorbiert. Der absorbierte Anteil wird in Wärme umgewandelt und kann für den Schweißprozess genutzt werden. Wie viel Prozent der eingesetzten Laserleistung vom Werkstück absorbiert wird, hängt vom sogenannten Absorptionsgrad ab, welcher wiederum stark von der Wellenlänge des eingesetzten Lasers abhängig ist. Für Kupfer steigt der Absorptionsgrad zu kürzeren Wellenlängen hin an. Eine höhere Absorption wirkt sich demnach auch positiv auf die Schweißtiefe aus.

Das Absorptionsvermögen ist wiederum vom Oberflächenzustand des Werkstücks abhängig. So ist die Energieeinkopplung in das Werkstück aufgrund einer erhöhten Absorption bei dunklen, matten, rauen oder einheitlich oxidierten Oberflächen im Vergleich zu blanken Oberflächen günstiger.

Beschichtungen, wie Vernickeln oder Verzinnen, steigern demnach das Absorptionsvermögen von Kupferwerkstoffen und ermöglichen eine gleichmäßigere und effizientere Energieeinkopplung. Eine Feuerverzinnung mit 1 bis 3 µm Schichtdicke zum Beispiel erhöht die Strahleinkopplung und die Absorption um mindestens 10% [3].

Die Verwendung von Zusatzwerkstoffen bewirkt eine Änderung der physikalischen Eigenschaften des Grundwerkstoffs und damit das Absorptionsvermögen [4].

Diese Veröffentlichung wurde von einer Gruppe erfahrener Fachleute in ehrenamtlicher Gemeinschaftsarbeit erstellt und wird als eine wichtige Erkenntnisquelle zur Beachtung empfohlen. Der Anwender muss jeweils prüfen, wie weit der Inhalt auf seinen speziellen Fall anwendbar und ob die ihm vorliegende Fassung noch gültig ist. Eine Haftung des DVS und derjenigen, die an der Ausarbeitung beteiligt waren, ist ausgeschlossen.

Das Ausdehnungsverhalten von Kupferwerkstoffen hängt von der Energiedichte, der Wärmeeinbringung, dem Schweißverfahrens und der Vorwärmtemperatur ab und ist beim Schweißen zu berücksichtigen.

Die reinen und niedriglegierten Kupferwerkstoffe (DIN EN/TS 13388) sind mit cw-, Scheiben- oder Faserlaser mit hoher Strahlqualität und einer Mindestleistung von 3 kW bei Vorschubgeschwindigkeiten von  $v > 10$  m/min gut schweißbar. Mit einer geeigneten Pulsformung lassen sich diese Werkstoffe auch zuverlässig laserpunktschweißen.

### 2 Kupferlegierungen

Bei den Kupferlegierungen (DIN EN/TS 13388) nimmt die Wärmeleitfähigkeit mit zunehmenden Legierungselementen wie Zink, Zinn, Nickel, Aluminium und weiteren Legierungselementen ab. Eine Abnahme der Wärmeleitfähigkeit hat zur Folge, dass weniger Energie in das umliegende Material transportiert wird und somit der Schweißprozess in der Wechselwirkungszone zwischen Laser und Werkstück zur Verfügung steht. Eine Zunahme an Legierungselementen wirkt sich demnach positiv auf die Absorption des Materials aus. Kupferlegierungen sind demnach im Allgemeinen besser schweißbar [5; 6].

Als Anwendungsbeispiele für das Laserstrahlschweißen von Kupferlegierungen im Bereich sehr dünnwandiger Querschnitte seien das Verbinden von Kett- und Schussdrähten von Geweben aus Kupfer-Zinn-Legierungen, von Federdrähten aus Kupfer-Beryllium mit Widerstandsdrähten aus Kupfer-Nickel-Legierungen, von Federdrähten aus Kupfer-Zinn-Legierungen mit elektrischen Kontakten aus Gold und die Verbindung von lackisolierten Kupferdrähten mit Stahl in Hochfrequenz-Filterspulen genannt [7; 8].

Durch eine geringe Streckenenergie, gezielte lokale Energieeinkopplung, hohe Schweißgeschwindigkeit und rasche Schmelzbad-erstarung können Nähte mit sehr schmalen Wärmeeinflusszonen realisiert werden.

Rohre aus Kupfer oder Kupferlegierungen lassen sich mit hohen Geschwindigkeiten gut mit dem Laserstrahl schweißen.

### 3 Festkörperlaser

Heutzutage erhältliche Scheiben- oder Faserlaser sind durch eine sehr gute Strahlqualität gekennzeichnet. Durch diese gute Strahlqualität lassen sich sehr kleine Fokusedurchmesser und sehr hohe Leistungsdichten realisieren, mit welchen ein Tiefschweißen in den hoch reflektierenden Kupferwerkstoff ermöglicht wird.

#### 3.1 Faserlaser

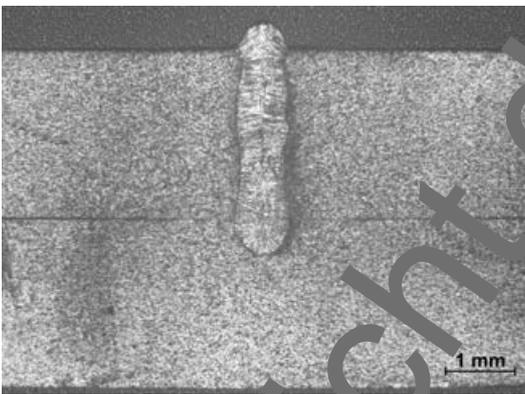
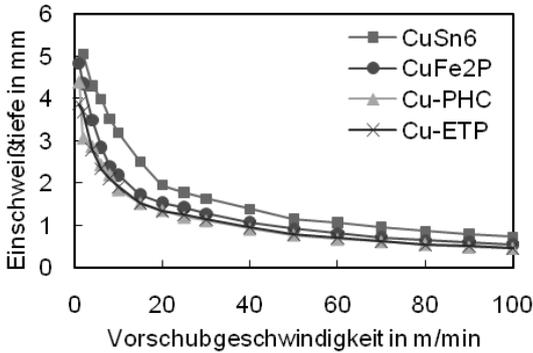
In der folgenden Tabelle sind einige erprobte Schweißparameter und die Leistung der verwendeten Faserlaserquelle dargestellt:

**Tabelle 1. Die Faserlasergeschwindigkeit beim Schweißen von Kupfer und Kupferlegierungen bei einer Faserlaserquellenleistung von 4 KW und Stumpfstoßnaht [9].**

Werkstoffnummer	Werkstoff	Werkstückdicke [mm]	Geschwindigkeit [m/min]
2.0040 / CW008A	Cu-OF	3	4
2.0090 / CW024A	Cu-DHP	3	3
2.0321 / CW508L	CuZn37	3	4
C70250	CuNi3Si1Mg	3	4
2.1020 / CW452K	CuSn6	4	4
2.0040/2.0321	Cu-OF/CuZn37	2,5	3
2.0090	Cu-DHP/CuSnZnPb-Leg.		3

**3.2 Scheibenlaser**

Mit Scheibenlasern höchster Brillanz (sehr gute Strahlqualität) werden die erforderlichen Leistungsdichten für das Verschweißen von Kupferbauteilen erreicht. In Bild 1 (oben) zeigt das Diagramm die erreichbaren Einschweißtiefen mit einem 5-kW-Scheibenlaser in unterschiedlichen Kupferlegierungen und Kupferwerkstoffen; (unten) exemplarisch ein Schlibbild einer I-Naht-Überlapp-Verbindung, in CuFe2P dargestellt.



**Bild 1.** Oben: Einschweißkurven mit einem Scheibenlaser von Kupfer und Kupferlegierungen bei einer Laserleistung von 5 kW in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit; unten: Schlibbild einer I-Naht-Überlapp-Verschweißung von CuFe2P, Laserleistung P = 5 kW, 6 m/min, Fokusbereich d<sub>f</sub> = 100 µm [10].

**3.3 Grüner Laser**

Eine Steigerung des Absorptionsgrades in Kupfer kann durch eine kürzere Wellenlänge der Laserstrahlung erreicht werden. Durch die Entwicklung von frequenzverdoppelten Scheibenlasern, welche „grünes“ Laserlicht emittieren und dadurch besser

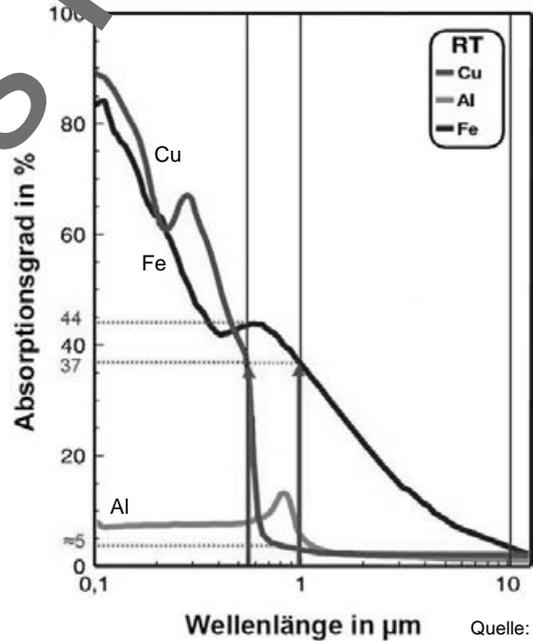
vom Kupferwerkstoff absorbiert werden können bei verhältnismäßig kleinen Leistungsdichten Kupferwerkstoffe geschweißt werden [10].

Der Absorptionsgrad von Kupfer für Laserstrahlquellen, die Laserlicht mit einer Wellenlänge von etwa 1 µm emittieren, beträgt ungefähr 5% (Bild 2). Bei frequenzverdoppelten Systemen, also Laserstrahlquellen, die Laserlicht mit nur halb so großer Wellenlänge, d. h. 0,5 µm emittieren, kann der Absorptionsgrad auf etwa 37% erhöht werden [11].

Das folgende Bild 2 zeigt die Absorptionskurven für Kupfer, Aluminium und Eisen bei Raumtemperatur und senkrechtem Strahleneinfall [11].

**Absorption (λ ~1 µm):**  
 Kupfer: ~ 5%  
 Eisen: ~37%

**Absorption (λ ~0,5 µm):**  
 Kupfer: ~37%  
 Eisen: ~44%



**Bild 2.** Absorptionsgrad von Metallen über der Wellenlänge bei Raumtemperatur und senkrechtem Strahleneinfall [11...13].

In Bild 3 sind Einschweißkurven eines frequenzverdoppelten Scheibenlasers mit einer Wellenlänge von 515 nm bei einer Laserleistung von 200 W in verschiedenen Kupferlegierungen und Kupferwerkstoffen dargestellt. Der Fokusbereich des Laserstrahls auf dem Werkstück beträgt 30 µm.