

Der folgende Leitfaden soll Antworten auf Fragen zum Laserstrahllöten von Stahl-Aluminium-Mischverbindungen liefern. Er entstand im Rahmen des IGF-Vorhabens „Innenhochdruckumformen laserstrahlgelöteter Tailored Hybrid Tubes aus Stahl-Aluminium-Mischverbindungen für den automobilen Leichtbau“. Das Vorhaben 18028 N (01.02.2014 - 31.07.2016) der Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT) und der Europäischen Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung (EFB) e.V. wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

### Folgende Punkte sollten im Vorfeld bedacht werden:

Wie entsteht die Lötverbindung?

Die Verbindung der Fügepartner entsteht durch Diffusion, d.h. einen Atomaustausch zwischen Lot und Grundwerkstoff. Eine schmelzflüssige Vermischung der Fügepartner findet nicht statt. Eine Benetzung durch das Lot ist die Voraussetzung für einen erfolgreichen Lötprozess.

Was kann ich von einer Lötverbindung erwarten?

Die maximal erreichbare Festigkeit der Lötverbindung ist bedingt durch den schwächsten Bestandteil der Verbindung, in den meisten Fällen ist dies das Lot. Eine weitere mögliche Schwachstelle ist die (auf Diffusion basierende) Anbindung zwischen Lot und Grundmaterial.

Was muss ich hinsichtlich der Temperaturführung beachten?

Der Schmelzpunkt von (Rein-)Aluminium liegt bei 660 °C, der Schmelzpunkt von Eisen bei 1538 °C. Der Wärmeintrag sollte so niedrig gehalten werden, dass keiner der Werkstoffe aufschmilzt.

Wo liegen die Vorteile des Laserstrahllöten von Stahl-Aluminium-Verbindungen (im Vergleich zum Laserstrahlschweißen)?

Zunächst ist der reduzierte thermische Einfluss des Fügeverfahrens kennzeichnend, weiterhin entsteht im Gegensatz zum Schweißen kein gemeinsames Schmelzbad, nur das Lot geht in den flüssigen Zustand über. Damit kommt es zu einer Reduzierung der Bildung intermetallischer Phasen und als Folge zu einer geringeren Sprödigkeit der Naht. Bei der Verwendung von Zink-Loten kann der Korrosionsschutz von verzinkten Stahlblechen aufrechterhalten werden.

Was sind Nachteile des Laserstrahllöten von Stahl-Aluminium-Verbindungen (im Vergleich zum Laserstrahlschweißen)?

Aufgrund der Art der Verbindung ist die maximal erreichbare Festigkeit im Vergleich zu geschweißten Verbindungen geringer. Außerdem ist ein Lot als Füllmaterial notwendig, wohingegen Schweißen je nach Anforderung mit und ohne Zusatzwerkstoff möglich ist. Weiterhin ist aufgrund der Zeit, die das Lot zum Schmelzen und Benetzen benötigt, die maximale Prozessgeschwindigkeit beschränkt.

Was sind intermetallische Phasen und wie entstehen sie?

Intermetallische Phasen sind eine Anordnung von Atomen mindestens zweier unterschiedlicher Metalle. Dabei unterscheidet sich der Gitteraufbau dieser Phasen von denen, die die ursprünglichen Metalle ausbilden (vgl. Angaben zur Kristallstruktur in Tabelle 1).

Tabelle 1: Eisen-Aluminium-Phasen und deren Eigenschaften [Zer02]

Phase	Struktur	Al-Gehalt At.-%	Härte HV
Fe ( $\alpha$ )	krz	0,0 - 44,6	>140
Fe <sub>3</sub> Al ( $\beta'$ )	geordnet krz (D0 <sub>3</sub> )	23,6 - 34,1	250 - 300
FeAl ( $\beta''$ )	geordnet krz (B <sub>2</sub> )	23,3 - 54,9	400 - 520
Fe <sub>2</sub> Al <sub>7</sub> ( $\epsilon$ )	komplex krz	63,0	650 - 680
FeAl <sub>2</sub> ( $\zeta$ )	komplex rhombohedral	65,6 - 66,9	1000 - 1050
Fe <sub>2</sub> Al <sub>5</sub> ( $\eta$ )	krz-orthorombisch	70,0 - 73,3	1000 - 1050
FeAl <sub>3</sub> ( $\theta$ )	komplex monoklin krz	74,5 - 76,6	1000 - 1100
Al	kfz	100	>40

Eisen (als Hauptbestandteil des Stahls) und Aluminium sind im schmelzförmigen Zustand vollständig mischbar, in der festen Phase aber entstehen intermetallische Verbindungen (vgl. Zweiphasendia-

gramm in Abbildung 1). Deren kovalente und ionische Bindungen machen das Material spröde (siehe Härtewerte in Tabelle 1), dazu trägt ebenso die komplexe Atomanordnung, die zur Behinderung von Versetzungsbewegungen führt, bei. Aluminium diffundiert ab 500 °C in Eisen, Eisen von 350 °C bis 500 °C in Aluminium. Unter 350 °C kommt es bei schneller Erwärmung zu keiner Diffusion. Ab 660 °C (Schmelzpunkt Aluminium) steigt die Rate schlagartig. Es bildet sich eine saumartige Grenzschicht, deren Ausdehnung abhängig von Zeit und Temperatur ist. Besonders die aluminiumreichen Phasen ( $\text{FeAl}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  und  $\text{FeAl}_3$ ; grau markiert in Abbildung 1) beeinträchtigen die Festigkeit der entstandenen Verbindung. Eine Reduzierung auf unter 2  $\mu\text{m}$  wurde gezeigt [Not16].

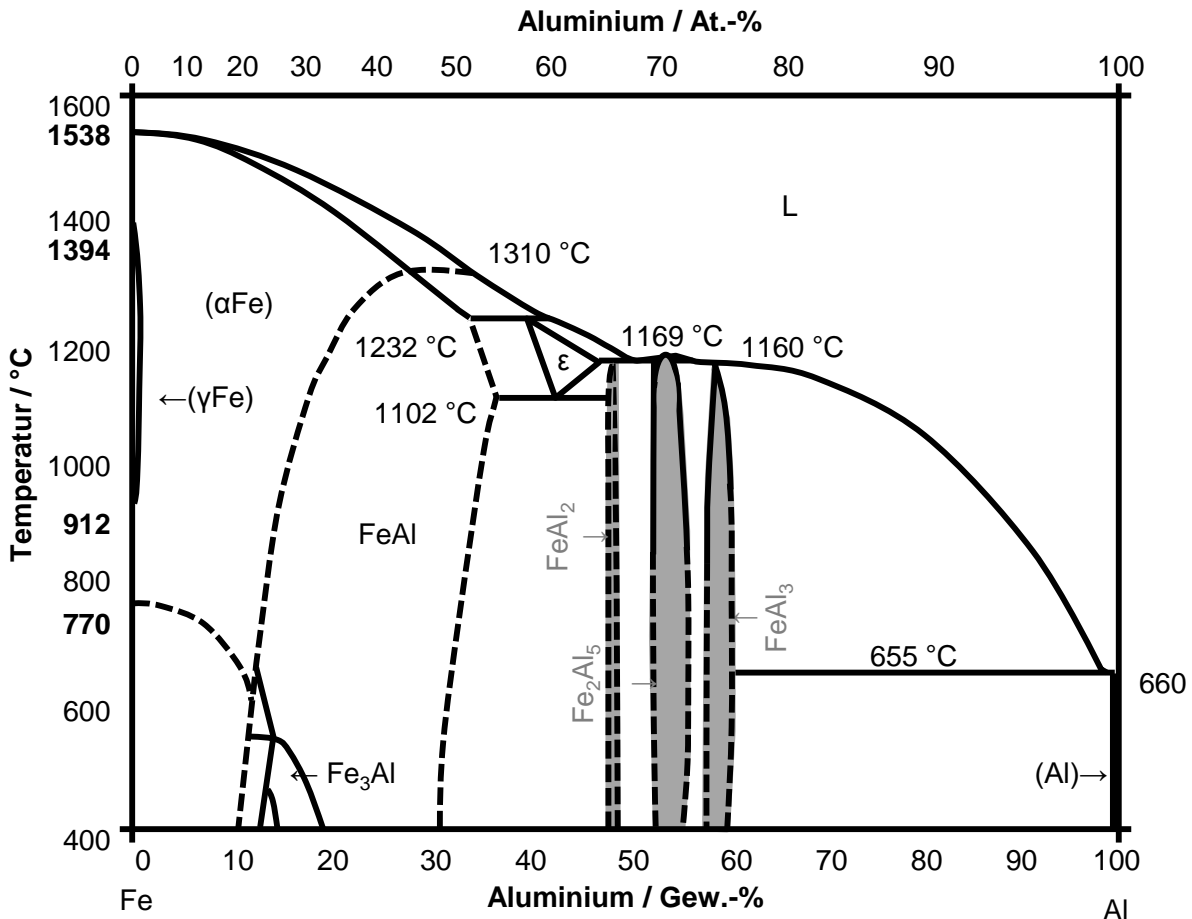


Abbildung 1: Binäres Eisen-Aluminium Zustandsdiagramm nach [Oza12]

Wie kann die Bildung intermetallischer Phasen reduziert werden?

Die Temperatur sollte über den Prozess hinweg möglichst gering gehalten werden, um die Diffusion der Legierungsbestandteile des Lotes in den Grundwerkstoff und die Anreicherung an den Korngrenzen zu begrenzen.

Was sind die Vorteile des Lötens mit dem Laser?

Der Laser ist ein Werkzeug, welches sich sehr genau und lokal beschränkt einsetzen lässt. Daher lässt sich der thermische Einfluss so gering wie nötig halten. Weiterhin sind hohe Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit charakteristisch für Laserprozesse.

Welche weiteren Risiken bringen von Stahl-Aluminium-Verbindungen mit sich?

Aufgrund der unterschiedlichen elektrochemischen Potenziale kann es zu Korrosion kommen.

Welche Arten von Loten können verwendet werden?

Die Lote werden unterschieden in Hartlot (Schmelzpunkt > 450 °C) und Weichlot (Schmelzpunkt < 450 °C). Ein Beispiel für ein Hartlot sind AlSi-Legierungen (Eutektikum 577 °C), man spricht von einem artgleichen Zusatzwerkstoff für Aluminiumverbindungen, ein Werkstoff der Legierungsgruppe ist

AlSi12 (Schmelzbereich 577 - 582 °C). ZnAl-Legierungen (Eutektikum 382 °C) sind ein Beispiel für Weichlote, hier ist z.B. ZnAl4 mit einem Schmelzbereich von 382 - 387 °C zu nennen.

Welche Kriterien sollten bei der Lotauswahl beachtet werden?

Die Arbeitstemperatur des Lotes muss unterhalb der Schmelztemperatur der Fügepartner liegen. Dies ist insbesondere für niedrigschmelzende 7xxx-Legierungen zu beachten. Der Schmelzbereich des Lotes sollte möglichst klein sein. Das gewählte Lot sollte eine gute Benetzungsfähigkeit der Fügepartner zeigen, dies lässt sich ggf. mithilfe von Flussmitteln erreichen. Unter Beachtung der mechanischen Eigenschaften wird das Lot passend zur Materialpaarung und zum Einsatzzweck gewählt. Die maximale Erwärmung im Anwendungsfall sollte nicht in der Nähe des Schmelzbereichs des Lotes liegen. Die Kriechneigung von Weichloten sollte bei der Auslegung beachtet werden.

Was ist für den Werkstoff Aluminium insbesondere zu beachten?

Aluminiumlegierungen bilden eine Oxidschicht an der Oberfläche, die dem Schutz vor Korrosion dient. Diese besteht aus  $Al_2O_3$ , die Schmelztemperatur dieser Verbindung liegt bei 2050 °C, ein hoher Mg-Gehalt führt zu einer besonders beständigen Schicht. Diese Oxidhaut muss vor dem bzw. im Prozess entfernt und die Neubildung verhindert werden. Möglichkeiten dazu sind: Verwendung von Flussmitteln, Beizen, mechanische Behandlung (Bürsten) sowie anschließender Schutz vor erneuter Oxidation durch: Schutzgasatmosphäre, Vakuum.

Was ist ein Flussmittel?

Ein Flussmittel entfernt beim Löten durch Aktivierung bei Arbeitstemperatur die Oxidschicht. Dabei ist zu beachten, dass einige Flussmittel korrosiv wirken und eine Reinigung notwendig machen. Warnhinweise und Hinweise zur Gesundheitsschädigung sind den Sicherheitsdatenblättern des gewählten Produkts zu entnehmen. Nicht korrosive Flussmittel sind bis 0,9 % Mg-Anteil wirksam, korrosive Flussmittel ermöglichen ein Löten von Aluminiumlegierungen mit bis 3 % Mg [Ost07].

Was ist bei der Wahl der Spanvorrichtung zu beachten?

Die Spaltgeometrie ist je nach Anwendungsfall auszulegen. Dabei sollte die (von der Spaltbreite abhängige) Kapillarwirkung genutzt werden können, der Spalt sollte sich auf keinen Fall nach unten erweitern. Weiterhin sollte die Wärmeausdehnung der verwendeten Materialien bedacht werden: Aluminium zeigt eine um den Faktor zwei erhöhte Wärmedehnung im Vergleich zu Eisen (Fe:  $11,8 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ , Al:  $23,1 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ ). Weiterhin sollte die Spannsituation berücksichtigen, dass es im Aluminiumwerkstoff bei hohen Temperaturen zu einem Festigkeitsverlust kommen kann.

Was sollte bei der Kantenvorbereitung im Stumpfstoß beachtet werden?

Die Kanten sollten möglichst parallel und rechtwinklig sein, dabei ist vor allem die stahlseitige Kante (in Abbildung 2 mit einem Pfeil markiert) von Interesse. Abbildung 2 zeigt den Vergleich verschiedener Kantenqualitäten. Die qualitativ hochwertig vorbereitete rechtwinklige Kante a) zeigt eine sehr gute Spaltfüllung, auch Kantenqualität (b) ist für den Lötprozess ausreichend. In allerdings c) führt die schlechte Kantenqualität zu einer nicht vollständigen Anbindung.

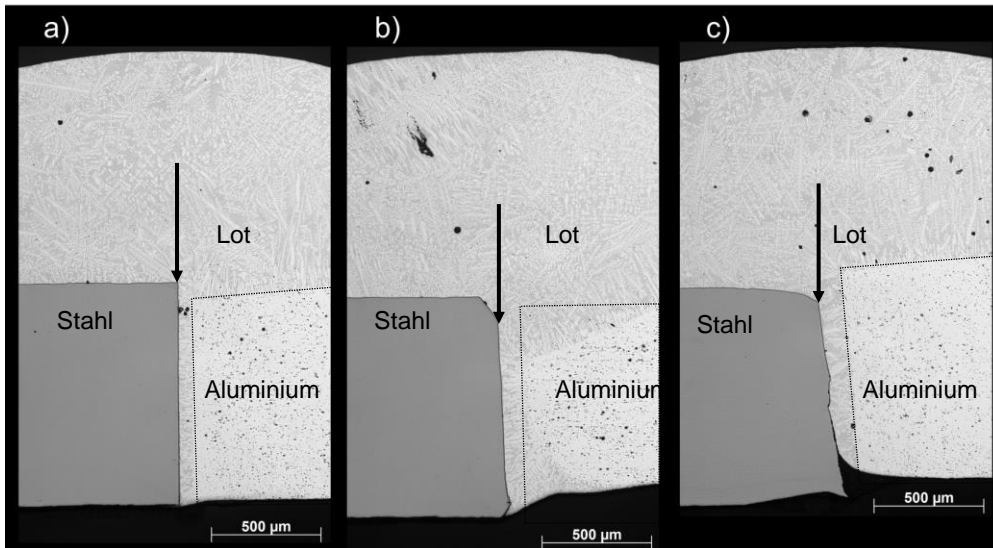


Abbildung 2: Vergleich von drei verschiedenen Schnittkantenqualitäten für eine Stumpfstoß-Verbindung

### Folgende Punkte sollten beim Laserstrahllöten beachtet werden:

Welche Auswirkungen kann der Wärmeintrag zeigen?

Einflüsse auf die Fügezone, Gefügeveränderungen und Veränderungen der mechanischen Eigenschaften sind möglich. Bei aushärtbaren Aluminiumlegierungen sollte auf diesen Punkt besondere Aufmerksamkeit gelegt werden.

Was ist bei der Wahl der Laserstrahlquelle zu beachten?

Die Strahlqualität ist für die Prozessstauglichkeit weniger ausschlaggebend als beispielsweise bei Laserschweißprozessen, da aufgrund der verwendeten Drahtdurchmesser (1,2 - 1,6 mm) das Arbeiten im (kleinen) Fokus zumeist ineffektiv ist. Ein Einstrahlwinkel von 10° sollte zum Schutz vor Rückreflexion (Aluminium) eingestellt werden. Die Spotgröße wird in Abhängigkeit vom verwendeten Lot(-drahtdurchmesser) gewählt. Es gibt verschiedene Optionen zur Vergrößerung des Spots, z.B. durch Scannersteuerung oder den Einsatz von Optiken (Linienoptik). Dies dient der besseren Verteilung der Temperatur über den Draht. Für den Lötprozess ist ein Schutz der Optiken vor Flussmittelrauch und anderen Prozessemissionen vorzusehen (Schutzglas, Crossjet).

Was ist bei der Verwendung von Lot in Drahtform zu beachten?

Die Drahtzufuhr kann stechend oder schleppend sein, letztes bevorzugt. Der Draht sollte mit leichtem Druck in die Fügezone eingebracht werden.

Gibt es bei der optischen Beobachtung bzw. Emissionserfassung Schwierigkeiten?

Die Messung kann eine Beeinflussung durch Flussmitteldämpfe, Prozessemissionen oder Reflexion erfahren. Liegt der Messpunkt in der Fügezone, ist dessen Größe entscheidend, da bei zu großem Messpunkt über festes Lot, flüssiges Lot, Grundwerkstoffe und Flussmittel gemittelt wird.

### Folgende Punkte sollten bei der Beurteilung von Stahl-Aluminium-Laserstrahlötverbindungen beachtet werden:

Ist eine Anbindung zwischen Lot und Grundwerkstoff gegeben?

Fehlende Anbindung siehe Abbildung 3 a)

Sind Risse vorhanden?

(vgl. Abbildung 3 b)

Ist der Spalt gefüllt?

Abbildung 3 c zeigt eine unzureichende Spaltfüllung, Abbildung 3 d einen vollständig gefüllten Spalt)

Wurde das Aluminium angeschmolzen (Abbildung 3 e)?

Wenn ja: kein reiner Lötprozess. Kann dennoch je nach Anwendungsfall ebenfalls zum gewünschten Ergebnis führen.

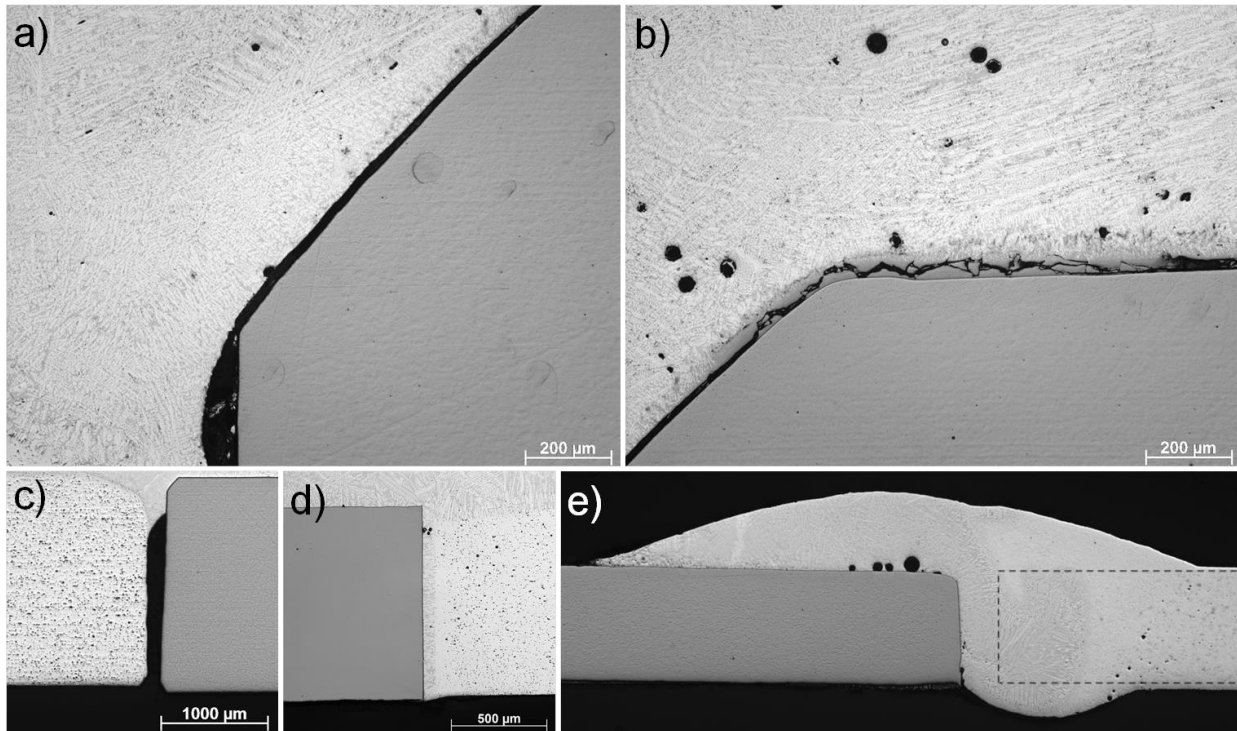


Abbildung 3: Übersicht Nahtfehler a) fehlende Anbindung zwischen Lot und Grundmaterial b) Risse im Anbindungsbereich c) unvollständig gefüllter Spalt d) vollständig gefüllter Spalt e) Aluminiummaterial aufgeschmolzen (Lage vor Lötprozess markiert)

Welche Einflussfaktoren auf das Ergebnis des Lötprozesses gibt es?

Abbildung 4 zeigt einige dieser Einflussfaktoren.

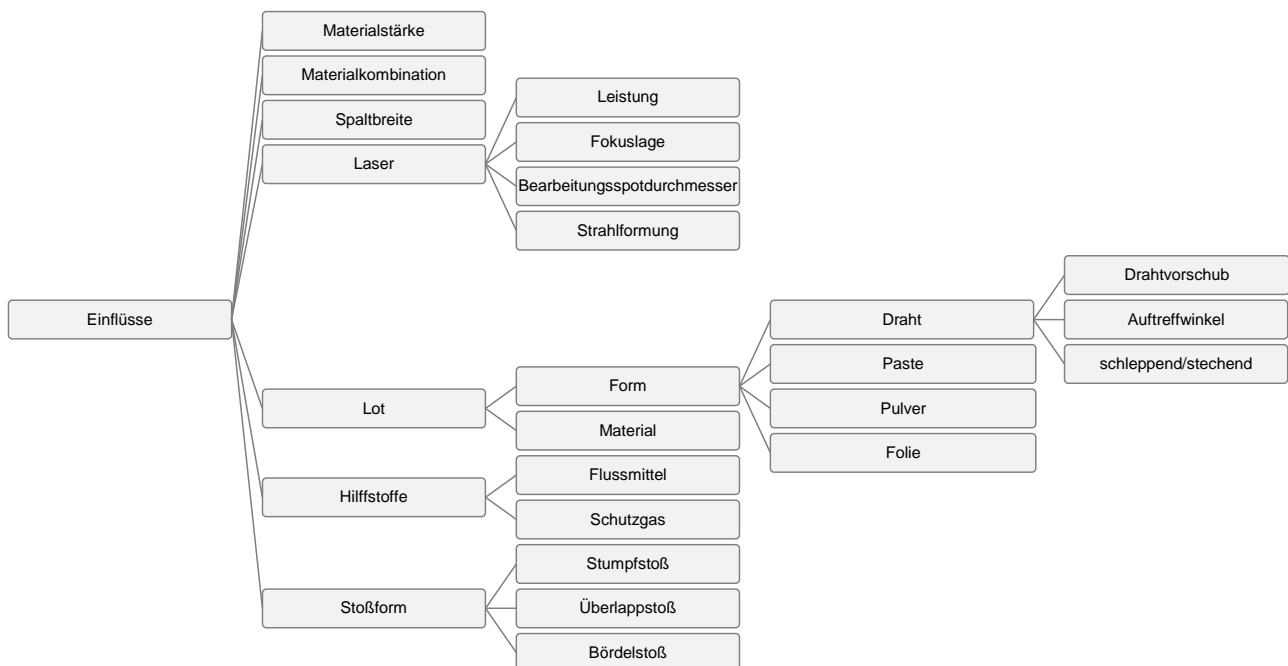


Abbildung 4: Einflussfaktoren beim Laserstrahllöten

Für weitere Hinweise und detaillierte Parameter beachten Sie bitte auch den Abschlussbericht. Bitte bedenken Sie die situationsabhängige Übertragbarkeit.

### Normen (Auswahl)

DIN 1707-100:2011-09	Weichlote - Chemische Zusammensetzung und Lieferformen
DIN 1900:2010-04	Anforderung und Qualifizierung von Lötverfahren für metallische Werkstoffe - Verfahrensprüfung für das Lichtbogenlöten von Stählen
DIN 1912-4:1981-05	Zeichnerische Darstellung; Schweißen, Löten; Begriffe und Benennungen für Lötstöße und Löt Nähte
DIN 8514:2006-05	Lötbarkeit
DIN EN 1045:1997-08	Hartlöten - Flussmittel zum Hartlöten - Einteilung und technische Lieferbedingungen
DIN EN 12797:2000-12	Hartlöten - Zerstörende Prüfung von Hartlötverbindungen
DIN EN 12799:2000-12	Hartlöten - Zerstörungsfreie Prüfung von Hartlötverbindungen
DIN EN 13134:2000-12	Hartlöten - Hartlötverfahrensprüfung
DIN EN 14324:2004-04	Hartlöten - Anleitung zur Anwendung hartgelöteter Verbindungen
DIN EN ISO 13585:2012-10	Hartlöten - Prüfung von Hartlötern und Bedienern von Hartlötgeräten
DIN EN ISO 17672:2010-11	Hartlöten - Lote (Norm-Entwurf DIN EN ISO 17672:2015-04)
DIN EN ISO 3677:1995-04	Zusätze zum Weich-, Hart- und Fugelöten - Bezeichnung (Norm-Entwurf DIN EN ISO 3677:2015-06)
DIN EN ISO 9453:2014 -12	Weichlote - Chemische Zusammensetzung und Lieferformen
DIN EN ISO 9454-2:2000-09	Flussmittel zum Weichlöten - Einteilung und Anforderungen - Teil 2: Eignungsanforderungen
DIN ISO 857-2:2007-03	Schweißen und verwandte Prozesse - Begriffe - Teil 2: Weichlöten, Hartlöten und verwandte Begriffe
DIN EN 29454-1:1994-02	Flußmittel zum Weichlöten; Einteilung und Anforderungen; Teil 1: Einteilung, Kennzeichnung und Verpackung (Norm-Entwurf DIN EN ISO 9454-1:2014-02)
EN ISO 18279: 2004-04	Hartlöten - Unregelmäßigkeiten in hartgelöteten Verbindungen
ISO 5179:1983-10	Untersuchung der Hartlötbarkeit mittels eines Prüfstückes mit wechselnder Spaltbreite
ISO 5187:1985-05	Schweißen und verwandte Verfahren; Verbindungen mittels Weichlot und Hartlöt-Zusatzwerkstoffen; mechanische Prüfmethode

### Literaturverzeichnis

- [Ost07] Ostermann, F.: *Anwendungstechnologie Aluminium*. Springer, Berlin Heidelberg, 2007
- [Oza12] Ozaki, H., Kutsuna, M.: *Dissimilar Metal Joining of Zinc Coated Steel and Aluminum Alloy by Laser Roll Welding*. In: *Welding Processes, Welding Processes*, InTech, 2012, 33-54
- [Rad97] Radscheit, C. R.: *Laserstrahlfügen von Aluminium mit Stahl*. Universität Bremen, 1997
- [Zer02] Zerner, I.: *Prozessstabilisierung und Ergebnisse für das Laserstrahlfügen von Aluminium-Stahl-Verbindungen*. Dissertation Universität Bremen, IDEE&Druck, Bremen 2002
- [Not16] Nothdurft, S.; Springer, A.; Kaieler, S.; Ross, J.; Stonis, M.: *Laser Soldering and Brazing of Steel-Aluminum Sheets for Tailored Hy-brid Tubes*. *Journal of Laser Applications*, 2016, 2

Kontakt: ✉ Laser Zentrum Hannover e.V.  
Hollerithallee 8  
30419 Hannover  
☎ +49 511 2788-100  
@ info@lzh.de