# ₩**IFSW** Im Fokus

# Anwendungspotenzial stark fokussierender Laser

In den letzten Jahren entwickelten sich Laser zu wichtigen Werkzeugen der industierellen Fertigung. Hohe Prozessgeschwindigkeit und gute Schweißqualität, niedrige Wärmebelastung sowie die hoheFlexibilität sind wesentliche Vorteile des Laserschweißens. Obwohl die heutigen lampengepumpten Nd:YAG-Laser teurer sind und eine schlechtere Fokussierbarkeit als CO<sub>2</sub>-Laser aufweisen, finden diese in immer mehr Anwendungsbereichen Verwendung, speziell beim cw-Schweißen von 3D-Strukturen. Die kürzere Wellenlänge der Nd:YAG-Laser im Vergleich zu CO,-Lasernmacht den Strahltransport durch Glasfasern möglich, welche eine hohe Flexibilität sowie niedrige Kosten der Handhabungsgeräte erlauben. Des Weiteren wird der Laserstrahl mit der kürzeren Wellenlänge in Metallen besser absorbiert und ist weniger empfindlich bezüglich des laserinduzierten Plasmas. Hinsichtlich dieser Aspekte und unter Berücksichtigung der Kundenanforderungen, sowie einer marktgerechten Gestaltung, sind neueste Entwicklungen darauf gerichtet, die oben genannten Nachteile der lampengepumpten Festkörperlaser zu reduzieren. Laser der neusten Generation, Scheibenlaser sowie Faserlaser, zeichnen sich durch ihre sehr gute Fokussierbarkeit und hohe Effizienz aus. Für die Anwendung ist überdies die Fokussierbarkeit interessant. Sie beschreibt, wie stark sich ein Laserstrahl maximal mit optischen Elementen fokussieren lässt und wird über das inverse Strahlenparameterprodukt festgelegt. Stärkere Fokussierbarkeit lässt sich nutzen, um kleinere Fokusdurchmesser zu erzielen, die Dimensionen optischer Elemente und verwendender Bearbeitungsköpfe zu reduzieren, die Schärfentiefe (Rayleigh-Länge) auszudehnen und um größere Arbeitsabstände zwischen Fokussieroptik und Werkstück zuschaffen.

Von den genannten Möglichkeitenwird bisher lediglich die letztgenannte in größerem Umfang genutzt. Für die Nutzung von Scannern zum sogenannten Remoteschweißen ist eine starke Fokussierbarkeit notwendige Bedingung. Auch wirkt sich dabei eine Steigerung der Fokussierbarkeit besonders stark aus.

Wenig beachtet werden hingegen die Möglichkeiten, die sich aus der Reduzierung des Fokusdurchmessers ergeben. Bei ausreichend hoher Vorschubgeschwindigkeit (v>=6 m/min) skaliert die Einschweißtiefe mit P/d<sub>r</sub>, d. h. der Einfluss des Fokusdurchmessers auf die Schweißtiefe weist den gleichen Stellenwert auf wie die Laserleistung. Mit der Verfügbarkeit des 4 kW Scheibenlasers sind erstmalig Tiefschweißungen im hohen Leistungsbereich mit Fokusdurchmessern bis zu 75 µm möglich. Im Folgenden soll das hieraus resultierende Potential zur Erzielung von Schweißnähten mit hohem Aspektverhältnis dargestelltwerden.

### ExperimentelleErgebnisse Einfluss des Fokusdurchmessers auf die Einschweißtiefe

Die Einschweißtiefe wird bei Schweißgeschwindigkeiten über 6 m/min maßgeblich durch den Fokusdurchmesser beeinflusst, da mit dessen Abnahme die mittlere Intensität im Fokus ansteigt. Abbildung 1 stellt die Einschweißtiefe für Stahl (links) und Aluminium (rechts) bei verschiedenen Fokusdurchmessern in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit dar. Die Schweißergebnisse wurden hierbei im Falle der Fokusdurchmesser von 300 bis 450 µm mit einem lampengepumpten Stablaser (LSL) mit 4 kW max. Leistung und bei Durchmessern von 75 bis 200 µm mit einem diodengepumpten Scheibenlaser (DSL) durchgeführt.

Die Diagramme zeigen für die beiden Materialien einen beachtlichen Einfluss des Fokusdurchmessers auf die Einschweißtiefe. Die drei Kurven, welche mit dem lampengepumpten System realisiert sind, zeigen die klare Abhängigkeit der Einschweißtiefe vom Fokusdurchmesser ab einer Geschwindigkeit von ungefähr 6 m/min. Der Wechsel zum Scheibenlaser ermöglicht Fokusdurchmesser von 200 - 75 µm. Hierbei tritt ein unerwartetes Verhalten auf: Die Zunahme der Einschweißtiefe mit abnehmendem Fokusdurchmesser setzt sich für beide Materialen nur bis zum Durchmesser von 150 µm fort. Bei der Schweißung mit den Fokusdurchmessern 100 und 75 µm vermindert sich die Einschweißtiefe.

# Einfluss des Fokusdurchmessers auf die Querschnittsfläche

Um den Mechanismus zu erklären, der diese Abnahme der Einschweißtiefe verursacht, wird zunächst die Querschnittsfläche der Schweißnaht untersucht, welche repräsentativ für den Prozesswirkungsgrad ist. Es liegt die Vermutung nahe, dass ein laserinduziertes Plasmas die Bedingungen für die EnergieeinkopplungdurchAbsorption und Reflektion verändern könnte. Vom Schweißen mit CO<sub>2</sub>-Lasern kennt man den starken Einfluss von Gasen. besonders Helium, auf die Plasmaausbildung. Dies wird hier selbst bei stärkster Fokussierung auf 75 µm nicht beobachtet, siehe Abbildung 2 (links).

Abbildung 2 (rechts) zeigt, dass die Querschnittsfläche im Wesentlichen unabhängig vom eingestellten Fokusdurchmesser ist. Dies bedeutet wiederum, dass der Prozesswirkungsgrad nicht durch die Größe des Fokusdurchmessers verändert wird.

Dagegen ist ein starker Einfluss der Fokussierung auf die Schweißnahtform zu beobachten (Abb. 3): Oberhalb einer Geschwindigkeit von 6 m/min zeigt sich, dass sich die Schweißnahtformen in Abhängigkeit der Fokussier-



Abb. 1: Einschweißtiefe in Abhängigkeit des Vorschubs in Stahl und Aluminium.



Abb. 2: Querschnittsfläche für verschiedene Schutzgase (links) und Fokusdurchmesser (rechts) in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit.

bedingungen verändern und zusätzlich in drei Gruppen klassifizieren lassen. Die Nähte mit der größten Einschweißtiefe ( $d_f = 150 \,\mu m$ und 200 µm) weisen eine schlanke Form auf. Dies ist die Folge der verbesserten Fokussierbarkeit und des Abbildungsverhältnisses von 1:1  $(\theta_0 = 5,71^\circ)$ . Eine nähere Betrachtung der Nahtgeometrie für  $d_f = 75 \ \mu m$  und 100  $\mu m$  $(\theta_0 = 11,31^\circ)$  zeigt, dass die seitliche Neigung der Nahtflanken den gleichen Winkel wie der fokussierte Laserstrahl in freier Propagation aufweist. Offensichtlich spielt bei solch starken Fokussierungen nicht nur der Taillendurchmesser des Strahls sondern auch seine Divergenz eine entscheidende Rolle für die Energieeinkopplung und die dadurch resultierende Einschweißtiefe.

## Einfluss des Divergenzwinkels bei Fokusdurchmessernkleiner 200 µm

Aus den bisherigen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass der Divergenzwinkel die Nahtform beim Schweißenmit Fokusdurchmessern kleiner als 200 µm entscheidend beeinflusst. Um diesen Effekt auf direktem Wege zu demonstrieren, wird der Divergenzwinkel bei konstantem Fokusdurchmesser durch Veränderung des Abbildungsverhältnisses und des Kerndurchmessers der Glasfaser variiert. Auf diesem Weg lassen sich zwei verschiedene Divergenzwinkel ( $\theta_0 = 11,31^\circ$ und  $\theta_0 = 8,59^\circ$ ) bei einem Fokusdurchmesser von 100 µm realisieren.

Der Einfluss der unterschiedlichen Divergenzwinkel auf die Einschweißtiefe für Stahl und Aluminium sind deutlich in Abbildung 4 zu sehen. Dabei führt die kleinere Divergenz zu einer größeren Einschweißtiefe im gesamten untersuchten Geschwindigkeitsbereich. Für Vorschubgeschwindigkeiten bis v<=6 m/min, bei denen die Einschweißtiefe zunehmend von Wärmeleitung geprägt wird, nähern sich die beiden Kurven einander an. Hingegen führt bei größeren Geschwindigkeiten der kleinere Divergenzwinkel zu einem Tiefengewinn bis ungefähr 0,45 mm für Stahl und sogar 1 mm für Aluminium.Für zwei repräsentative Vorschubgeschwindigkeiten und die beiden Materialien Stahl und Aluminium fasst Abbildung 5 die oben geschilderten Ergebnisse zusammen: Bei Fokusdurchmessern zwischen  $d_f = 600 \,\mu m$ und 200 µm ist die Ein-



Abb. 3: Querschnittsfläche für Fokusdurchmesser bis 450 µm bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 9 m/min in 4 mm dickem Stahl.



Abb. 4: Einschweißtiefe als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit für zwei verschiedene Divergenzwinkel in Stahl (links) und Aluminium (rechts);  $P_L = 3 kW$ ,  $d_f = 100 \mu m$ .

schweißtiefe, in Übereinstimmung mit früheren Aussagen, tatsächlich proportional zu  $1/d_{f}$ . Jedoch setzt bei ca. 150 µm eine plötzliche Umkehr ein, die sogar zu einer Abnahme der Einschweißtiefe führt. In einer tiefer gehenden Betrachtung wird dies durch die Intensitätsverteilung entlang der Strahlpropagation erklärt. Durch eine Verminderung des Divergenzwinkels (z. B. durch ein kleineres Strahlparameterprodukt des eines sehr kleinen Fokusdurchmessers und geringen Divergenzwinkels möglich machen würde, wird eine weitere Erhöhung der Einschweißtiefe und eine Verbesserung der Schweißnahtqualität erwartet. Stark fokussierbare Laser, wie der Scheibenlaser oder der Faserlaser, haben das Potential, umdiesen Ansatz weiter zuverfolgen.



Abb. 5: Einschweißtiefe für Stahl und Aluminium als Funktion des inversen Fokusdurchmessers.

Lasersystems) lässt sich demnach die Einschweißtiefe erhöhen.

#### Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass bei sehr hohen Intensitäten, wie sie mit stark fokussierenden Lasern erreicht werden können, die Divergenz des fokussierten Strahls eine beachtliche Rolle spielt: Im Bereich von Fokusdurchmessern unter 200 µm stellt der Divergenzwinkel des fokussierten Strahls einen limitierenden Faktor bezüglich der Einschweißtiefe dar. Von einer weiteren Steigerung der Fokussierbarkeit, welche die gleichzeitige Verwendung Institutsadresse: Institut für Strahlwerkzeuge Pfaffenwaldring 43 70569 Stuttgart Tel.: +49 (0)711-685 6840 Fax: +49 (0)711-685 6842 http://www.ifsw.uni-stuttgart.de

Autor: Dipl.-Ing. Jan Weberpals FGSW - Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge mbH Pfaffenwaldring 43 70569 Stuttgart Tel.: +49 (0)711351 451-50 Fax: +49 (0)711351 451-51 E-Mail: jan.weberpals@fgsw.de

Kontakt / Redaktion: Dipl.-Ing. Friedemann Lichtner Tel.: +49 (0)711351 451-28 Fax: +49 (0)711351 451-29 E-Mail: friedemann.lichtner@fgsw.de http://www.fgsw.de