



# Dynamic beam shaping in der Lasermaterialbearbeitung – Neue Möglichkeiten

Mit den neuesten Entwicklungen von Laserstrahlquellen und -systemen stehen dynamische Strahlformungssysteme derzeit im Vordergrund. Und ein Blick in die Vergangenheit zeigt, dass die Strahlformung von Anfang an Teil der Laserentwicklung war. Doch was unterscheidet die neuesten Entwicklungen von allen anderen und warum hat diese Technologie das Potenzial, die Lasermaterialbearbeitung zu revolutionieren?

Mit der Erfindung des CO<sub>2</sub>-Lasers 1960 wurde ein neues Werkzeug für die Materialbearbeitung geschaffen. Durch stetige Weiterentwicklungen zu höheren Laserleistungen konnten mehr Verfahren, wie Schweißen und Schneiden angewendet werden. Parallel dazu stiegen auch die Anforderungen an Qualität und Effizienz, was weitere Modifikationen des Strahles erforderte.

Bereits eine verbesserte Strahlqualität kann als Strahlformungsprozess interpretiert werden. Im Jahr 1990 führten die Entwicklungen dann zum sogenannten phase-shaping, bei dem die Polarisationsrichtung des Laserstrahls in tangentialer Richtung zum Strahlradius verläuft, was positive Auswirkungen auf Qualität und Effizienz hat.

Mit der Erfindung des Scheibenlasers, konnte schließlich bei einer Wellenlänge von 1064 nm gearbeitet und damit Glas zur Fokussierung oder Brechung der Laserstrahlung verwendet werden. Axicons oder Multicore-Fasersysteme ermöglichen es heute, ringförmige Intensitätsverteilungen zu erzeugen, wie in Abbildung 1 gezeigt. Mit Keilen oder Prismen können Doppelspots erzeugt

werden und diffraktive optische Elemente (DOE) werden verwendet, um ein Interferenzmuster zu erzeugen. Auf diese Weise lassen sich auch beispielsweise quadratische Intensitätsverteilungen erzeugen. Diese mittlerweile allgemein verfügbaren Systeme erzeugen individuelle Strahlformen und können für spezielle Konfigurationen eingesetzt werden. Alle diese Optiken und Systeme haben jedoch eines gemeinsam: Das Strahlprofil ist statisch.

## DYNAMIC BEAM SHAPING

Mit den neuesten Entwicklungen im Bereich Coherent Beam Combining (CBC) ist es erstmals möglich, dynamische Strahlformen mit Laserleistungen über 10 kW zu erzeugen. Die Technologie dahinter ist recht einfach, aber unglaublich schwer in der Praxis umzusetzen - Civan Lasers hat es dennoch geschafft. Durch die Kombination von 10-100 kohärenten Singlemode-Faserlasern und die richtige Modulation der Phase des Laserstrahls in jeder Faser, können Interferenzeffekte genutzt werden, um einen einzigen Laserspot zu erzeugen. Wenn dann die Phase in jeder Faser richtig beeinflusst wird, kann die Position des Laserspots innerhalb eines be-

stimmten Bereichs positioniert werden. Die Position des Spots kann innerhalb von Nanosekunden verändert werden, so dass eine Abfolge von mehreren Spots an verschiedenen Positionen - eine Sequenz - vorgegeben werden kann. Die Sequenz kann dann, wie in Abbildung 3 gezeigt, spiralförmig aussehen, aber auch Dreiecke oder Smiley's sind möglich.

Das IFSW war eines der ersten Institute weltweit, welches im Jahr 2022 einen Laser von Civan für Forschungszwecke erhielt. Nach einiger Zeit, die für die ordnungsgemäße Integration in die Systeme und die Aktivierung aller Funktionen benötigt wurde, ist es nun an der Zeit, aktiv mit der Technologie zu forschen.

## DIE SUCHE NACH DER PERFEKTEN BEAM-SHAPE

Eine Strahlform ergibt sich daraus, welche Positionen des Spots während einer Sequenz angefahren werden, wobei eine Position auch mehrfach angefahren werden kann. Neben der Form an sich, ist mit der Sequenzdauer oder Frequenz ein neuer Freiheitsgrad vorhanden.

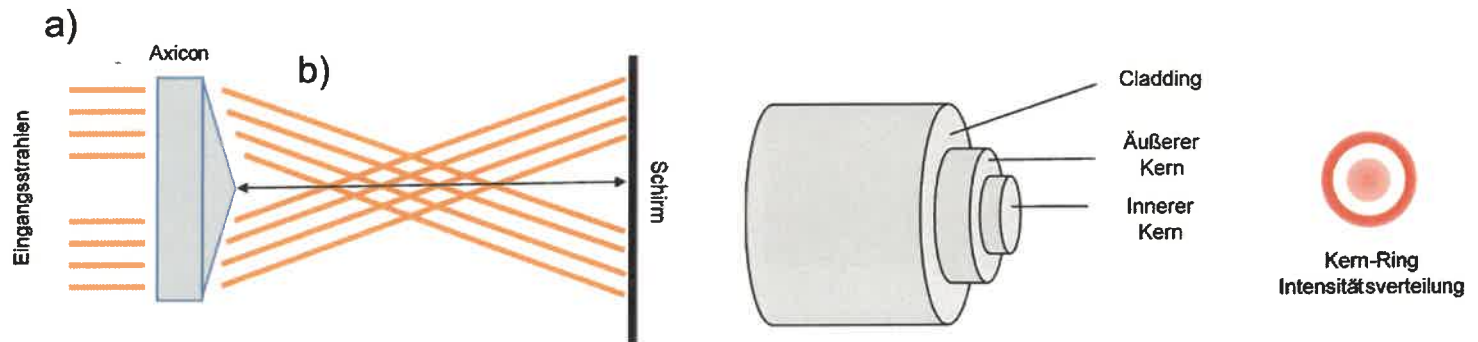
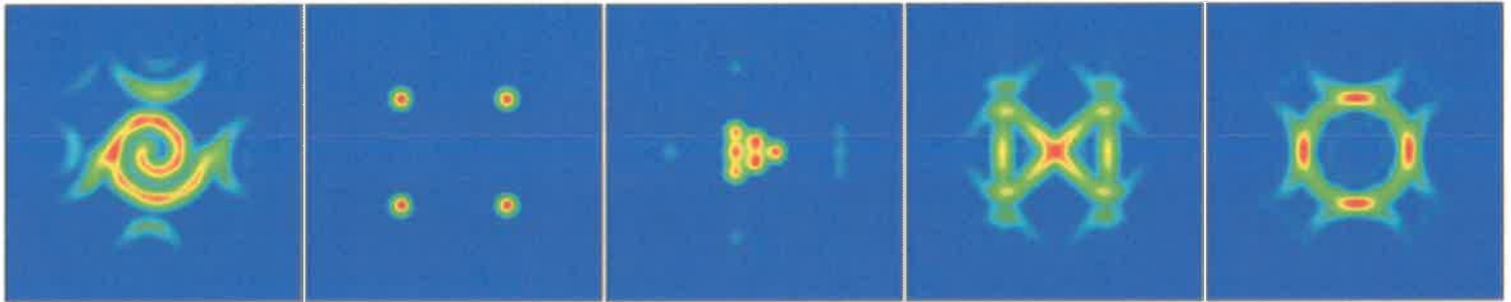


Abbildung 1: State-of-the-art Strahlformungssysteme.

a) AXICON bricht die kollimierten Strahlen zu einer ringförmigen Intensitätsverteilung. b) Mehrkernfasersystem, Laserstrahlung wird im inneren und äußeren Kern zur Bearbeitungsoptik geleitet und können Kern-Ring Intensitätsverteilungen erzeugt werden.



www.civanlasers.com

Abbildung 2: Beam shapes mit Coherent Beam Combining. Durch die Abfolge mehrerer unterschiedlich positionierter Einzelspots innerhalb einer Sequenz können frei einstellbare Strahlprofile erzeugt werden.

Am IFSW sind wir daran interessiert, den Einfluss der verschiedenen Formen und neuen Parameter auf den Schweißprozess zu verstehen, um die grundlegenden Mechanismen in Laserstrahlprozessen zu ergründen.

Dieses neue Verständnis kann dann bei der Gestaltung einer Strahlformsequenz berücksichtigt werden, um das beste Ergebnis in einem Laserprozess zu erzielen. Mit der Technologie des CBC, stehen damit alle Freiheitsgrade zur Verfügung: Die Strahlform, Frequenz der shape und verschiedene Strahlformabfolgen.

#### ERSTE ERGEBNISSE

Im Rahmen einer der ersten Versuchskampagnen wurde der Einfluss auf die Kapillarform einer aus neun Punkten bestehenden beam shape im Tiefschweißprozess untersucht. Abbildung 3 zeigt das gemittelte Bild einer Videosequenz aus der Hochgeschwindigkeits-Videoaufzeichnung. Die Kamera ist oberhalb der Probe positioniert, um die

Probenoberfläche zu erfassen und Einflüsse des Strahlprofils auf die Kapillare beobachten zu können. Die Schweißrichtung ist in x-Richtung mit einer Schweißgeschwindigkeit von 17 m/min.

Die Position der Strahlform zeigt Abbildung 3 b) mit einem blauen Quadrat. In der Aufnahme ist ein heller Bogen zu erkennen, der die Schmelze vor der Kapillare darstellt. Innerhalb des Bogens ist die Kapillarfront zu erkennen. Diese, die wie eine in Schweißrichtung weisende Spitze aussieht, passend zu der Form der beam shape.

Das gemittelte Bild zeigt, dass sich die Kapillarfront an die eingestellte Strahlform anpasst und deren Form annimmt. Dieses Phänomen kann man als capillary shaping bezeichnen. Und die Folgen einer solchen Kapillarform sind für die Mechanismen in einem Laserschweißprozess von großer Bedeutung: Änderungen der Schmelzflussgeschwindigkeiten und -ströme oder Änderungen der Geschwindigkeit und

Richtung des ausströmenden Dampfes - um nur zwei zu nennen.

Die Technologie bietet die Möglichkeit, so viele Einstellmöglichkeiten zu beeinflussen, dass aktive Forschung erforderlich ist, um die grundlegenden Mechanismen zu verstehen. Wenn die Mechanismen hinreichend verstanden sind, ist es denkbar, die Strahlform während des Schweißprozesses aktiv zu verändern, um beispielsweise Spritzer beim Einschweißen zu unterdrücken, Humping während der Hauptschweißung zu unterdrücken und Endkrater am Ende der Schweißung zu vermeiden.

Dies ist nur mit dynamischer Strahlformung möglich und die Technologie der kohärenten Strahlvereinigung hat das Potenzial, die Lasermaterialbearbeitung ebenso zu revolutionieren wie die Erfindung des Scheibenlasers. Die Suche nach den perfekten Strahlformen hat gerade erst begonnen, und das IFSW ist mit dabei, die Mechanismen dahinter zu verstehen.

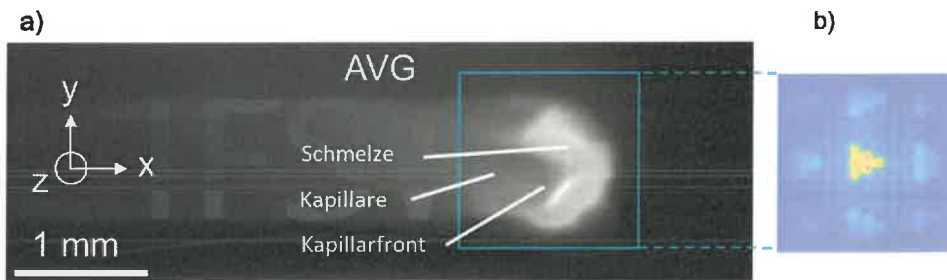


Abbildung 3: Gemitteltes Bild eines Hochgeschwindigkeitsvideos von einem Laserschweißprozess und die dabei genutzte Strahlform.

a) Das Bild zeigt die Probenoberfläche von oben und die Geometrie der Kapillare. Die Kapillarfront weist die gleiche Form auf wie die eingestellte Strahlform.

b) Eingestellte dreieckige Strahlform aus 9 Punkten und den durch Interferenzeffekte bedingten Seitenmaxima. Maßstabsgetreu zu a).

#### KONTAKT:

Felix Zaif, M.Sc.  
Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)  
Pfaffenwaldring 43  
70569 Stuttgart  
Tel.: +49 (0)711 685 63071  
felix.zaiss@ifsw.uni-stuttgart.de  
www.ifsw.uni-stuttgart.de

Dr.-Ing. Christian Hagenlocher  
Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)  
Pfaffenwaldring 43  
70569 Stuttgart  
Tel.: +49 (0)711 685 66855  
christian.hagenlocher@ifsw.uni-stuttgart.de  
www.ifsw.uni-stuttgart.de