

NEUE MASSSTÄBE BEIM LASERSCHNEIDEN: AXIALE DYNAMISCHE STRAHLFORMUNG FÜR WENIGER NANOGRAT UND MEHR GESCHWINDIGKEIT BEI CrNi-STAHL

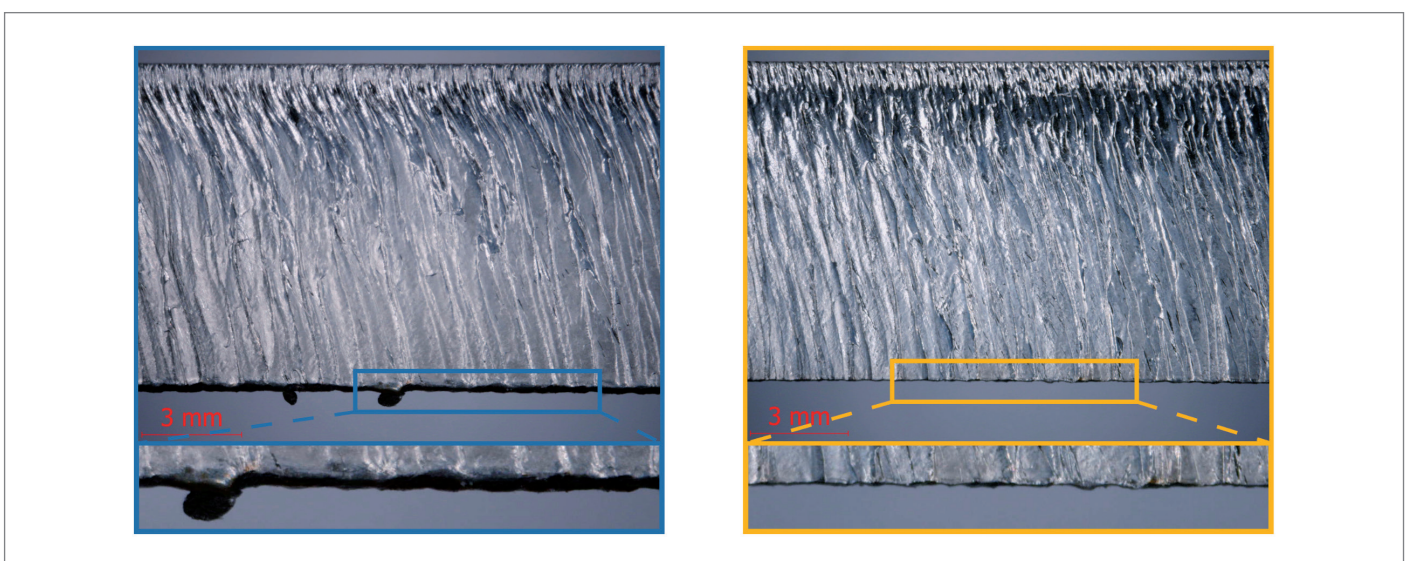
Die Effizienz und Qualität von Laserprozessen sind entscheidend für die moderne Fertigung. Beim Laserstrahlschmelzschnneiden führt der gaußförmige Strahl bei steigender Blechstärke oft zu Gratbildung und schlechterer Schnittflankenqualität. Die Strahlformung bietet hier eine Lösung. Diese Untersuchung analysiert die Wechselwirkungen der Strahlformung und deren Potenzial zur Prozessoptimierung.

Die Strahlformung hat sich als Schlüsseltechnologie in der Lasermaterialbearbeitung etabliert, denn sie ermöglicht die Anpassung des Laserstrahls an spezifische Anforderungen. Dabei unterscheidet man zwischen statischer und dynamischer Strahlformung (DBS). Für komplexe statische Intensitätsverteilungen (donutförmig oder quadratisch) wird auf fortschrittlichere Strahlformungstechnologien (u. a. refraktive oder diffraktive optische Elemente) zurückgegriffen. DBS bietet hier eine der flexibelsten Lösungen sowohl für die Ebene als auch in Strahlausbreitungsrichtung (axiale DBS), wodurch die Intensitätsverteilung und Strahlform flexibel an Schnittgeometrie und Material angepasst werden.

Erste industrielle DBS-Anwendungen in der Bearbeitungs-

ebene zeigen vor allem eine reduzierte Gratbildung. Allerdings ist die Steuerungstechnik für Kippspiegelsysteme anspruchsvoll und erfordert die Kontrolle von bis zu zwölf Parametern. In der axialen DBS reduziert sich die Anzahl der zu steuernden Parameter auf lediglich drei Freiheitsgrade: Schwingungsamplitude, Offset und Frequenz. Diese Reduktion erleichtert die Steuerung und Prozessoptimierung, allerdings bleibt die Dynamik der derzeit eingesetzten Systeme begrenzt. Die im Markt etablierten High-Power-Systeme sind in ihrer Dynamik auf Frequenzen von weniger als 100 Hz beschränkt.

Mit dem »Zwobbel®« (Fa. ROBUST AO) steht eine innovative Lösung für die axiale DBS zur Verfügung. Der deformierbare Spiegel ermöglicht eine Strahloszillation bis



■ Abb. 1: Vergleich der Schnittqualität zwischen statischem Fokus (links) und axialem DBS mit dem Zwobbel® (rechts).

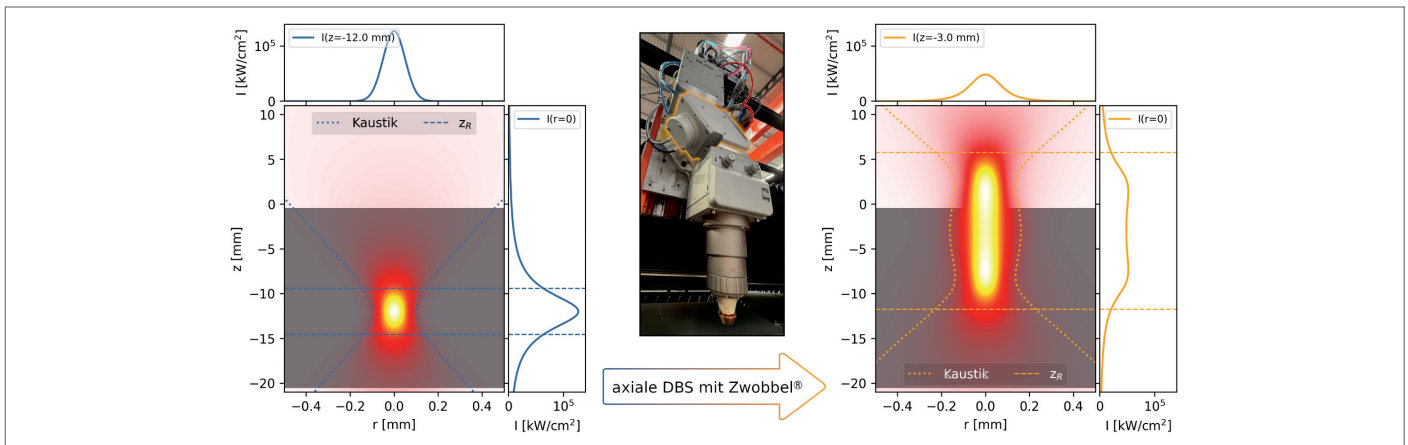


Abb. 2: Strahlsimulation bei statischem Fokus (links) und mit axialen DBS (rechts). Mitte: In den Schneidkopf integriertes Zwobbel®-Modul (gelb umrandet).

3 kHz zur gezielten Steuerung von Strahlkaustik und Intensitätsverteilung und ist nahtlos in bestehende Systeme integrierbar. Er reflektiert Laserleistungen bis 20 kW und deckt ein breites Wellenlängenspektrum ab.

Reduktion von Nanograt beim Schneiden von CrNi bis 20 kW

Die Optimierung von Laserprozessen erfordert neben empirischen Versuchen auch simulations- oder KI-gestützte Ansätze. Dieser Artikel vergleicht Intensitätsverteilungen statischer und axial dynamischer Strahlkaustiken zur Bestimmung wesentlicher Strahleigenschaften und Optimierung der Intensitätsverteilung im Material.

Die entwickelte Simulationsumgebung erlaubt die Berechnung der Strahlkaustik und Intensitätsverteilung für statische und axial oszillierende Laserfokusse. Durch die Variation der Quellparameter (Wellenlänge, Beugungsmaßzahl, Fokussierung und Faserdurchmesser), der Kollimations- und Fokussierbrennweite, der Schnittparameter (Fokuslage, Schnittgeschwindigkeit, Düsenabstand) und der Parameter der axialen DBS kann die Intensitäts- und Energiedichteverteilung im Material für statische und axial oszillierende Strahlen ermittelt werden. Ein iterativer Prozess aus Simulation und Validierung verbessert das Prozessverständnis und hilft die Schlüsselparameter für höchste Schnittqualitäten zu identifizieren und zu optimieren.

In einem Vergleichsexperiment wurden zuerst Referenzproben eines Laserschnitts von 10 mm-dicken Edelstahl (X5CrNi18-10) bei 20 kW Laserleistung angefertigt und evaluiert. Abb. 1 (links) zeigt die Schnittqualität des Referenzschnittes. Es ist zu sehen, dass sich eine homogene Schnittflanke ausgebildet hat, die Flankenrauheit liegt im Mittel bei $R_{a,stat} = 13 \mu\text{m}$. Die Analyse der Gratbildung zeigt vereinzelte Gratanhafungen (große Kugeln), die an der Unterkante fest hängen bleiben. Zusätzlich ist ein schwar-

zer Saum an der Blechunterseite, der sog. Nanograt, zu sehen. Der Grat wurde mit $0,43 \text{ mm} \pm 0,17 \text{ mm}$ quantifiziert. Nanograt ist ein besonders feiner Grat, der zu unregelmäßigen Oberflächen führt. Dies kann die Haftung von Schutzschichten verringern und dadurch Beschichtungen oder Lackierungen stören sowie die Korrosionsbeständigkeit der Bauteile beeinträchtigen.

Im nächsten Experiment wurde der axiale DBS-Prozess optimiert. Abb. 1 (rechts) zeigt das Ergebnis, welches bei einer signifikanten Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit von 7,6 m/min auf 10,4 m/min erzielt wurde. Damit stieg die Geschwindigkeit um 37%. Darüber hinaus ist klar ersichtlich, dass der Nanograt stark reduziert ist und keine Anhaftungen auftreten. Dieser Effekt war auch mit dem Finger zu spüren und die Grathöhe wurde mittels Mikroskops auf $0,04 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ bestimmt. Das Ergebnis der Optimierung war eine Reduktion der Gratanhftung um den Faktor 11 sowie eine Verringerung der Flankenrauheit um den Faktor 2,6 im Mittel von $R_{a,stat} = 13 \mu\text{m}$ auf $R_{a,DBS} = 5 \mu\text{m}$. Dies ist auf die angepasste Intensitäts- und Energieverteilung zurückzuführen. Um diesen Effekt zu verdeutlichen, diskutieren wir die Intensitätsverteilung an 20 mm-dicken CrNi-Stahl, bei der auch deutliche Qualitätsverbesserungen erzielt wurden.

Abb. 2 zeigt vergleichend die Intensitätsverteilungen bei statischem Strahl (links) und axialem DBS (rechts) und deren Position im Werkstück. Abb. 2 (links) zeigt, dass sich der statische Fokus 12 mm tief in dem 20 mm dicken Werkstück befindet, während der mittlere Fokus des axialen DBS nur bei 3 mm im Blech liegt. Weiterhin zeigt die Abbildung, dass die Strahlkaustik und die Intensitätsverteilung des axialen DBS länger ist. Die Rayleighlänge $Z_{R,DBS}$ beträgt 8,8 mm und ist damit um den Faktor 3,3 größer als im statischen Fall. Zudem vergrößert sich der Fokussdurchmesser von $\varnothing_{stat} = 200 \mu\text{m}$ auf $\varnothing_{DBS} = 324 \mu\text{m}$. In größeren Entfernungen von der Fokusebene nähert sich die Intensitätsverteilung des axialen DBS der (Inten-

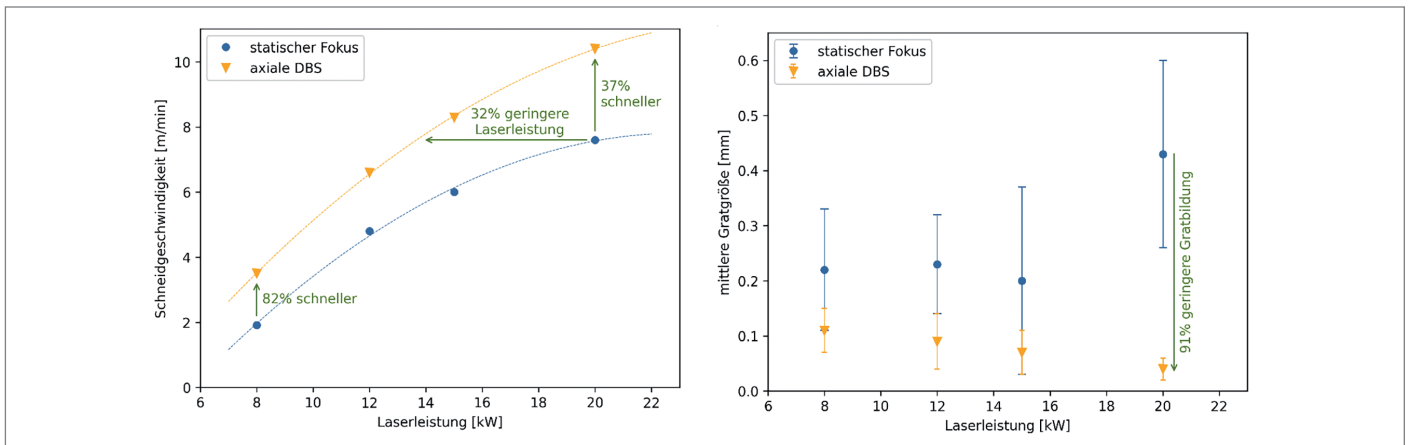


Abb. 3: Steigerung der Schnittgeschwindigkeit (links) und Reduzierung der Gratbildung (rechts) in Abhängigkeit der Laserleistung mit und ohne axialen DBS mit dem Zwobbel®.

sitätsverteilung) des statischen Fokus an. In der Fokusebene nimmt die maximale Intensität in der Mitte des Strahls ab. Der eigentliche Effekt entsteht entlang der Ausbreitungsrichtung.

Die Intensitätsverteilung entlang der Strahlenausbreitung wird entsprechend der Amplitude, der Frequenz und der Signalform geformt. Im Beispiel wandelt sich das Gaußprofil in ein Top-Hat ähnliches axiales Profil um. Es bildet sich eine Art »Linien-Fokus« aus, wodurch sich Intensität und Energie gleichmäßiger entlang der Achse verteilen, vergleiche Abb. 2.

Wir vermuten, dass die veränderte Intensitätsverteilung eine optimierte Wechselwirkung zwischen Laser und Werkstück bewirkt. Zudem führt der veränderte Wirkungsquerschnitt zu einem effizienteren Schmelzaustrieb. Die verringerte Rauigkeit sehen wir als Argument für diese These an.

Zusätzlich zur Verbesserung der Schnittqualität haben Tests mit der DBS-Technologie gezeigt, dass die Prozessstabilität hinsichtlich Schwankungen in der Fokusbildung und dem Düsenabstand signifikant erhöht werden konnte, ohne dass dies zu einer Verschlechterung der Schnittqualität führte.

Bei konstanter Blechstärke führt wachsende Leistung ab einer bestimmten Grenze nicht mehr zu höherer Geschwindigkeit. Dieser Sättigungseffekt wurde in Referenzexperimenten nachgewiesen. Abb. 3 zeigt die erreichte Schnittgeschwindigkeit über die Laserleistung ($P=8$ kW, 12 kW, 15 kW und 20 kW) und den Effekt der Sättigung bei statischem Fokus.

Die Schneidtests mit der axialen DBS-Technik zeigen einen Geschwindigkeitszuwachs von 82% bei 8 kW und 37% bei 20 kW. Zusätzlich tritt die Sättigung erst bei höheren Leistungen ein. Mit etwa 6 kW weniger Laserleistung kann bereits die Schnittgeschwindigkeit des 20 kW-Schnitts mit statischem Fokus erreicht werden. Besonders bei der Gratanhäufung zeigt die axiale DBS ihr Poten-

zial. Die Grathöhe ist beim Schnitt mit statischem Fokus bei 8-15 kW im Mittel auf 0,22 mm. Bei 20 kW steigt die Grathöhe jedoch auf 0,43 mm, während sie bei der axialen DBS von 0,11 mm (8 kW) kontinuierlich auf 0,04 mm (20 kW) sinkt. Eine optimale Abstimmung von Laserleistung, Schnittgeschwindigkeit und Oszillationsparametern sorgt so für einen geeigneten Mix aus Schnittqualität und Geschwindigkeit.

Fazit: Axiale DBS – Weniger Nanograt, mehr Tempo im Hochleistungs-Laserschneiden

Die Ergebnisse unserer Untersuchungen zeigen eindrucksvoll die Leistungsfähigkeit der axialen dynamischen Strahlformung im Hochleistungs-Laserschneiden von CrNi-Stahl. Im direkten Vergleich mit herkömmlichen Prozessen ermöglicht die axiale DBS eine drastische Reduzierung von Nanograt, eine deutlich verbesserte Schnittflankenqualität und eine signifikante Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit und das bei reduziertem Energieeinsatz.

Die Vorteile liegen auf der Hand: Weniger Nachbearbeitung, höhere Effizienz und eine gesteigerte Prozessstabilität. Wer also in der Blechbearbeitung auf maximale Wirtschaftlichkeit und Qualität setzt, sollte nicht länger zögern – die axiale DBS ist bereit für den industriellen Einsatz und bietet einen klaren Wettbewerbsvorteil.

Jetzt ist der richtige Zeitpunkt, diese wegweisende Technologie zu testen und in die eigenen Prozesse zu integrieren!

Kontakt:
 ROBUST AO GmbH
 Hans-Knöll-Str. 6
 07745 Jena
 Tel.: +49 3641 55 41 80
 E-Mail: info@robustao.de
 www.robustao.de