

Increased efficiency through dynamic beam shaping during laser cutting and welding

Motivation

In modern industrial manufacturing, the productivity of machines and the quality of components are top priorities. However, production efficiency is becoming increasingly important due to rising raw material prices and the lack of qualified personnel.

Fiber laser technology plays a central role as an enabler technology in macro laser material processing. Technological progress means that costs are constantly falling, while requirements are increasing due to greater sheet thicknesses and higher processing speeds. This development requires lasers with increasingly higher power and presents the industry with the challenge of finding a balance between high processing speed and component quality.

Fiber laser technology as a key element

Fiber laser technology with outputs of 10 kW and more has now established itself as a core element in the field of laser material processing of metals. The steadily falling investment costs are promoting its increasing popularity and technological progress. In order to reduce the contradictions between high productivity and quality, however, the process control must be expanded or adapted. One possible solution is dynamic beam shaping, which represents an alternative to constantly increasing laser power. Increasing laser power and dynamic beam shaping are not in direct competition, but can also complement each other.

Dynamic beam shaping in laser material processing

In the field of laser welding, dynamic beam shaping in the processing plane (X-Y wobbling) is already an established technology. This technology is also increasingly being used in industrial laser cutting. For this purpose, additional tilting mirror systems are used in the cutting head, which can oscillate at high frequencies of several hundred Hertz. These single-mirror scanner platforms are easy to integrate. However, operation is associated with more complex process control, since additional process parameters (up to twelve) are required for dynamic beam shaping in the processing plane compared to static beams. Especially with X-Y wobbling, the beam shaping parameters must also be adapted to the cutting direction.

In contrast, dynamic beam shaping in the beam propagation direction - Z-wobbling - reduces the number of degrees of freedom to three (oscillation amplitude, offset and frequency). This enables faster process optimization compared to X-Y wobbling.

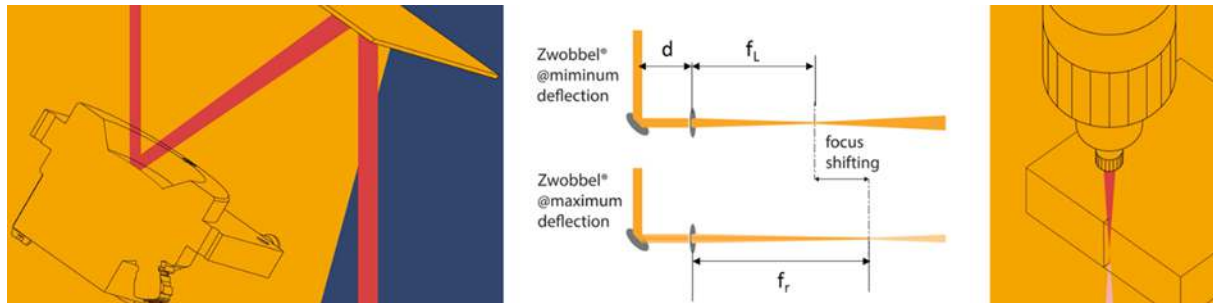
A challenge with the larger apertures of macro processing with ~10 kW is the limited dynamics ($f < 100$ Hz) of the electromechanical or pneumatic adaptive mirrors or mechanically movable lens systems used to date for focus tracking. These systems therefore limit the options for active (dynamic) beam shaping.

Adaptive optics as an alternative

A pioneer of dynamic beam shaping in the beam propagation direction is the Zwobbel® technology from ROBUST AO GmbH. The generation of a vertical high-frequency beam oscillation is based on the use of a piezo-driven deformable mirror (adaptive optics), see Figure 1. This approach takes advantage of higher system dynamics through fast actuators and offers enormous application potential through the use of mirror optics. By using commercial high-

performance coatings and a tempered mirror substrate, the technology can be applied to a wide wavelength range (IR, CO₂, blue) and reflect the highest laser powers.

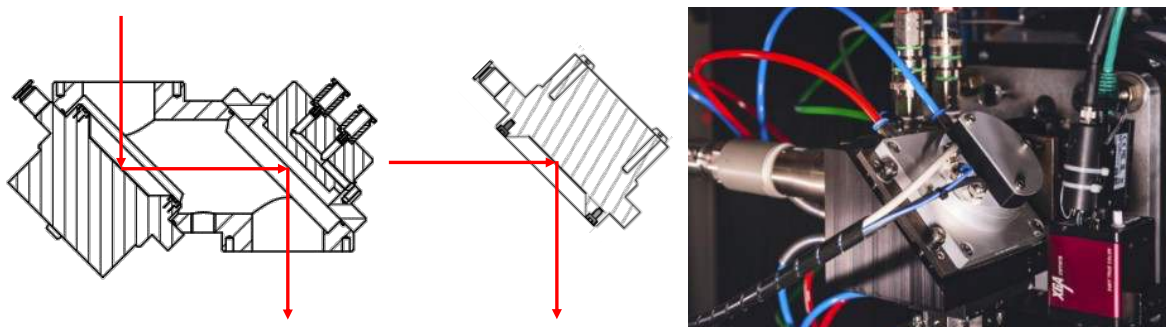
The adaptive optics influences both the beam caustics and the intensity distribution. The result is a manipulation of the thermomechanical and melt dynamic properties in the component, which leads to improved processing quality.



[Figure 1: left: principle diagram of the Zwobbel®, middle: functionality, right: dynamic beam shaping during cutting](#)

Zwobbel® Technology

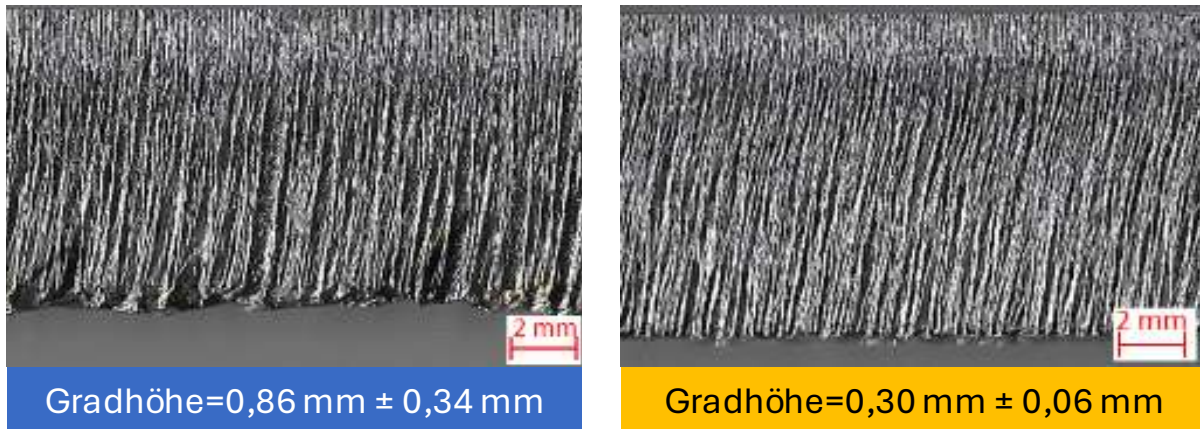
The Zwobbel® technology is modular and can be integrated into most conventional cutting and welding heads available on the market. The Zwobbel® system is available as a 90° or 180° version, see Figure 2, and for laser powers of up to 10 kW, for apertures larger than 10 mm (≈ 15 mm). A piezoelectric actuator deforms the elliptical mirror membrane in controlled operation with an integrated sensor. This ensures absolute focusing accuracy in the range of the static system. The high dynamics of the drive in controlled operation enables frequencies of up to 2 kHz, whereby the amplitude and the signal curve can be freely selected and easily adapted to the material to be processed and its geometry. In addition to sine, square and sawtooth signals, arbitrary signals can also be generated. This is of particular interest for 3D cutting. The short step response times of 2 milliseconds are particularly used in laser drilling and structuring applications. The maximum amplitude of the focus shift is essentially influenced by the focal length of the processing head, see Figure 1, and is comparable to lens-shifting systems.



[Figure 2: Possible arrangement of the Zwobbel® technology, Left: Schematic diagram of a 180 ° version with cooled deflection mirror, Middle: Schematic diagram of a 90 ° version, Right: Integration of a 90 ° version into a processing head](#)

Use in laser cutting

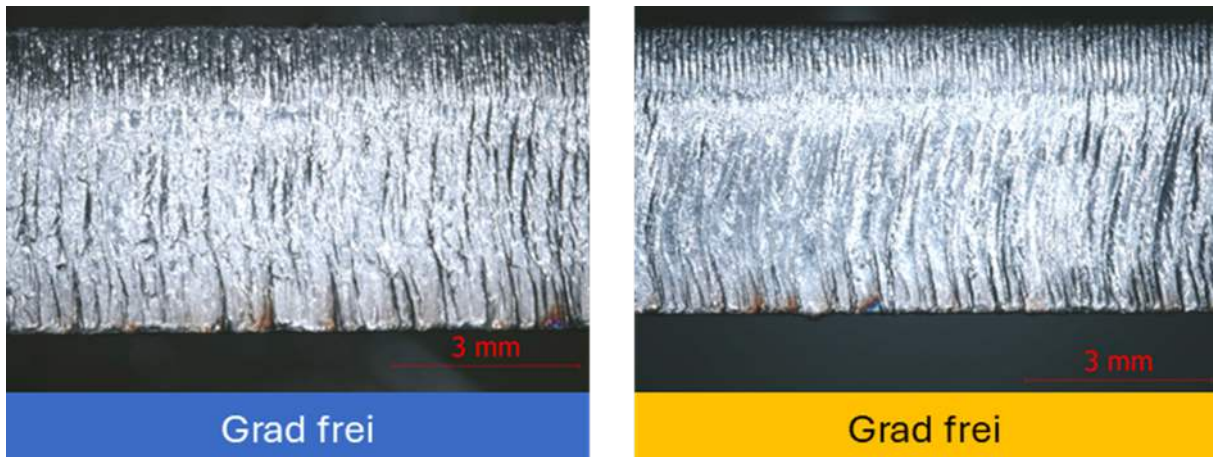
Dynamic beam shaping in the direction of beam propagation has only recently become available on the market and the main focus of its application has so far been on laser beam cutting. The use of Zwobbel® technology in laser melting cutting shows promising results. Tests with a laser power of up to 8 kW in the sheet thickness range of 0.5 mm to 10 mm have shown that a significant increase in cutting speed of up to 50% is possible with the same or improved cutting edge quality. In the case of structural steel, it has been shown that a reduction in burr adhesion on the underside of the sheet and in the cutting flank roughness can be achieved while simultaneously increasing the cutting speed (see Figure 3).



[Figure 3: S235JR sheet thickness 10 mm with P=6 kW, left: without Zwobbel® at v=1.7 m/min, right: with Zwobbel® at v=2.0 m/min](#)

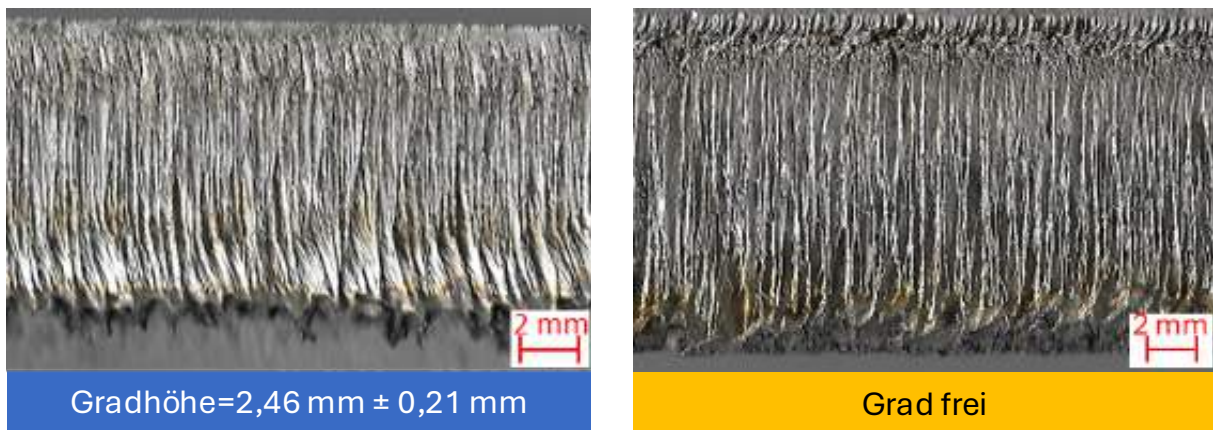
With a sales share of 73%, the entire CrNi market is dominated by flat products. In addition, the CrNi market has the second largest share in the area of laser material processing after structural steel and motivates technology testing in the material. The potential of dynamic beam shaping can be demonstrated using the example of a 5 mm CrNi sheet. In this sheet metal segment, the aim is to eliminate the intermediate step of preparing the cut edges for downstream processes such as welding or coating, which motivates high cut edge quality.

Figure 4 compares the cutting results with and without Zwobbel® technology, at 8 kW laser power. It can be seen that an increase in cutting speed of 50% can be achieved without any loss of quality. In addition, previous studies show that a reduction in gas pressure of up to 30% does not lead to a loss of speed or quality when dynamic beam shaping is used. If the total savings potential for the two examples is taken into account, the investment costs for the Zwobbel® technology are paid off after 2-5 months.



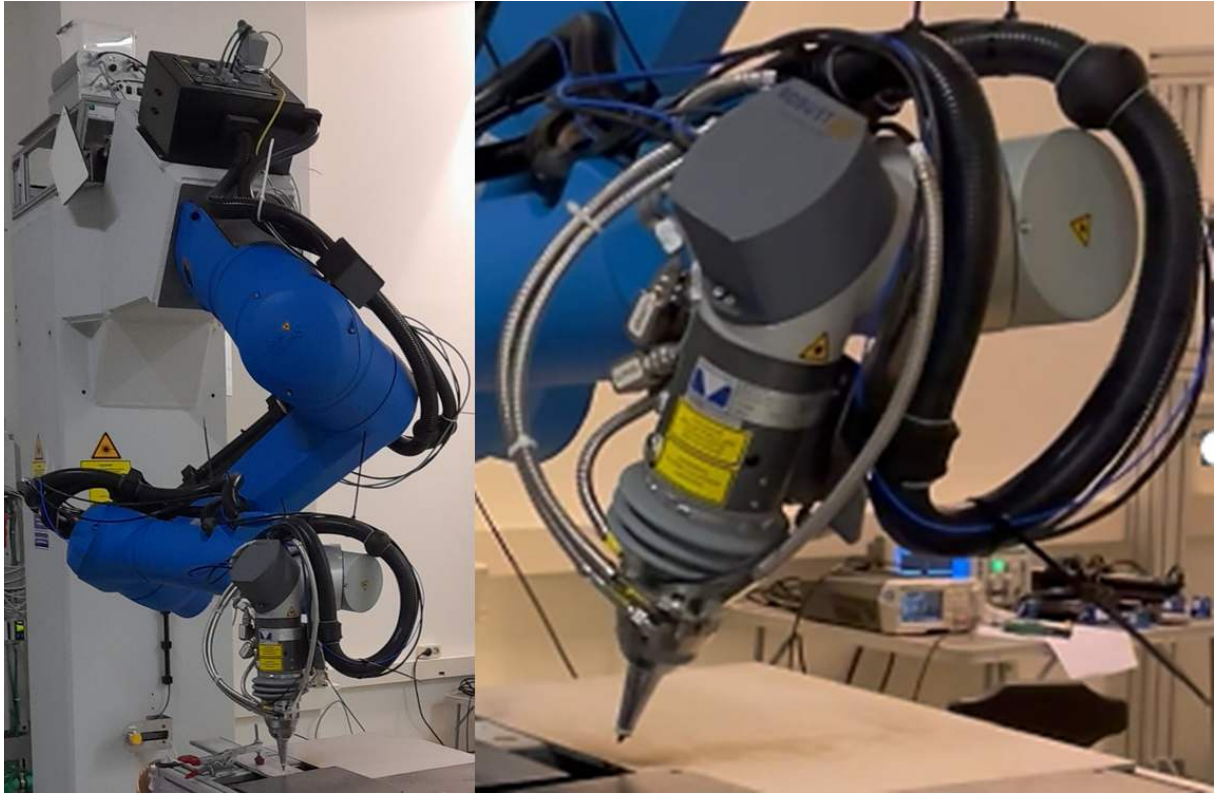
[Figure 4: X5CrNi18-10 sheet thickness 5 mm with P=8 kW, left: without Zwobbel® at v=3.5 m/min, right: with Zwobbel® at v=7.75 m/min](#)

Achieving consistent cutting edge quality is a challenge, particularly in the area of bevel cutting. The physical complexity of the cutting process, e.g. gas injection, increases significantly with bevel cutting. This has a direct effect on the melt expulsion and thus on the cutting quality. The performance of dynamic steel forming is clearly visible using a CrNi steel cut at 45° with a sheet thickness of 10 mm. With a laser power of 6 kW, no significant increase in feed is possible, but a significant increase in cutting edge quality is. A burr-free cut is only possible with the Zwobbel® technology in the example shown (Figure 5). In addition, the cutting edge roughness decreased.



[Figure 5: X5CrNi18-10 sheet thickness 10 mm with P=8 kW, v=1.4 m/min, left: without Zwobbel®, right: with Zwobbel®](#)

When cutting thin sheet metal using robots, the limiting factor is often poor accessibility. Increasing the nozzle distance would improve accessibility and flexibility in process control. The dynamic jet shaping tool led to an experimentally proven increase in the nozzle distance by a factor of 4. In addition, the technology was positively evaluated with a commercial cutting robot system (Figure 6).



[Figure 6: Integration into a commercial fiber laser cutting robot.](#)

The machine manufacturer Laservorm GmbH integrated the technology into its LV Midi processing systems last year, so that it is already available on an industrial scale.

Conclusion and outlook

Dynamic beam shaping in the plane is already being used successfully in the field of laser material processing. Zwobbel® technology provides a tool to extend or supplement dynamic beam shaping to the beam propagation direction. It has already proven its performance in the field of laser beam fusion cutting. It enables an increase in productivity and improves the cutting quality. Future investigations include the expansion to higher material thicknesses and laser flame cutting.

Fiber laser technology in combination with adaptive optics extends the process technology through dynamic beam shaping in one to three planes and thus represents a significant advance in macro laser material processing. It offers an efficient solution for the increasing demands of the manufacturing industry.

Effizienzsteigerung durch dynamische Strahlformung beim Laserschneiden und -schweißen

Motivation

In der modernen industriellen Fertigung haben die Produktivität der Maschinen und die Qualität der Bauteile oberste Priorität. Jedoch gewinnt die Produktionseffizienz aufgrund steigender Rohstoffpreise und des Mangels an qualifiziertem Personal zunehmend an Bedeutung.

Die Faserlasertechnologie spielt als Enabler-technologie eine zentrale Rolle in der Makro-Lasermaterialbearbeitung. Durch den technologischen Fortschritt sinken die Kosten stetig, während die Anforderungen durch größere Blechstärken und höhere Bearbeitungsgeschwindigkeiten steigen. Diese Entwicklung erfordern Laser mit zunehmend höherer Leistung und stellt die Branche vor die Herausforderung, eine Balance zwischen hoher Bearbeitungsgeschwindigkeit und Bauteilqualität zu finden.

Faserlasertechnologie als Schlüsselement

Die Faserlasertechnologie mit Leistungen von 10 kW und mehr hat sich inzwischen als Kernelement im Bereich der Lasermaterialbearbeitung von Metallen etabliert. Die stetig fallenden Investitionskosten fördern ihre zunehmende Verbreitung und den technologischen Fortschritt. Um jedoch die Gegensätze zwischen hoher Produktivität und Qualität zu reduzieren, bedarf es einer Erweiterung bzw. Anpassung der Prozessführung. Eine mögliche Lösung bietet die dynamische Strahlformung, die eine Alternative zu stetig steigender Laserleistung darstellt. Dabei stehen steigende Laserleistung und dynamische Strahlformung nicht unmittelbar in Konkurrenz, sondern können sich auch ergänzen.

Dynamische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung

Im Bereich des Laserschweißens ist die dynamische Strahlformung in der Bearbeitungsebene (X-Y-Wobbeln) bereits eine etablierte Technologie. Zunehmend findet diese Technologie auch im industriellen Laserschneiden ihre Anwendung. Dafür werden in den Schneidkopf zusätzliche Kippspiegelsysteme eingesetzt, die hochfrequent mit einigen Hundert Hertz oszillieren können. Diese Einspiegelscannerplattformen sind gut zu integrieren. Jedoch ist der Betrieb mit einer komplexeren Prozesssteuerung verbunden, da für die dynamische Strahlformung in der Bearbeitungsebene zusätzliche Prozessparameter (bis zwölf) im Vergleich zu statischen Strahlen erforderlich sind. Gerade bei der X-Y- Wobbeln müssen außerdem die Strahlformungsparameter entsprechend der Schneidrichtung angepasst werden.

Im Gegensatz dazu reduziert die dynamische Strahlformung in Strahlausbreitungsrichtung - Z-Wobbeln - die Anzahl der Freiheitsgrade auf drei (Schwingungsamplitude, Offset und Frequenz). Somit ist eine schnellere Prozessoptimierung im Vergleich zum X-Y- Wobbeln möglich.

Eine Herausforderung bei den größeren Aperturen der Makrobearbeitung mit ~10 kW liegt in der begrenzten Dynamik ($f < 100$ Hz) der bisher verwendeten elektromechanischen oder pneumatischen adaptiven Spiegeln oder auch mechanisch beweglichen Linsensystemen zur Fokuspachführung. Diese Systeme beschränken daher die Optionen für eine aktive (dynamische) Strahlformung.

Adaptive Optik als Alternative

Ein Wegbereiter der dynamischen Strahlformung in Strahlausbreitungsrichtung ist die Zwobbel®-Technologie der ROBUST AO GmbH. Die Generierung einer vertikalen hochfrequenten Strahloszillation basiert auf der Verwendung eines piezoangetriebenen deformierbaren Spiegels (adaptive Optik), siehe Abbildung 1. Dieser Ansatz nutzt den Vorteil einer höheren Systemdynamik durch schnelle Aktoren und bietet ein enormes Anwendungspotenzial durch die Verwendung einer Spiegeloptik. Durch die Verwendung kommerzieller Hochleistungsbeschichtungen und ein temperiertes Spiegelsubstrat, kann die Technologie auf einen breiten Wellenlängenbereich (IR, CO₂, blau) angewendet werden und dabei höchste Laserleistungen reflektieren.

Die adaptive Optik beeinflusst sowohl die Strahlkaustik als auch die Intensitätsverteilung. Das Ergebnis ist eine Manipulation der thermomechanischen und schmelzdynamischen Eigenschaften im Bauteil, was zu einer verbesserten Verarbeitungsqualität führt.

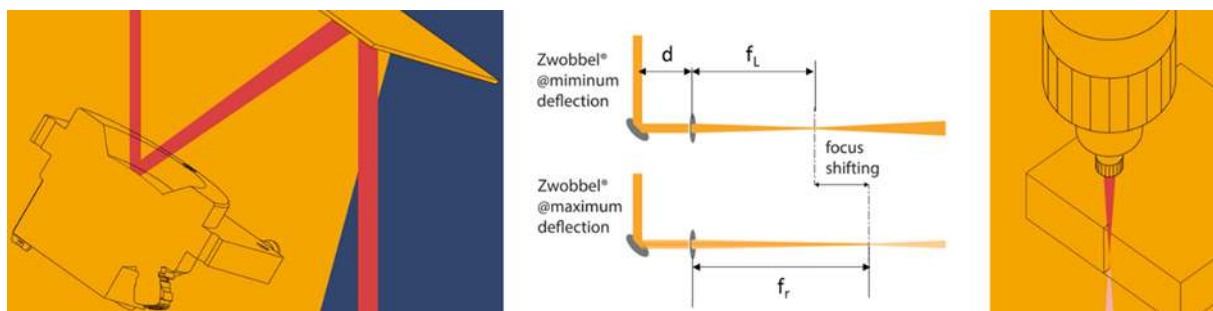


Abbildung 1: links: Prinzipdarstellung des Zwobbel®, mitte: Funktionsweise, rechts: dynamische Strahlformung beim Schneiden

Zwobbel®-Technologie

Die Zwobbel®-Technologie ist modular aufgebaut und kann in die meisten konventionellen, am Markt verfügbaren Schneid- und Schweißköpfen integriert werden. Das Zwobbel®System gibt es als 90° oder 180° Ausführung, siehe Abbildung 2, und für Laserleistungen bis zu 10 kW, für Aperturen größer als 10 mm (≈ 15 mm). Ein piezoelektrischer Aktor verformt die elliptische Spiegelmembran im geregelten Betrieb mit einem integrierten Sensor. Dadurch können absolute Fokussiergenauigkeiten im Bereich des statischen Systems sichergestellt werden. Die hohe Dynamik des Antriebs im geregelten Betrieb ermöglicht Frequenzen bis max. 2 kHz, wobei Amplitude sowie der Signalverlauf frei wählbar und auf das zu bearbeitende Material und dessen Geometrie leicht anpassbar sind. Neben Sinus-, Rechteck- und Sägezahnsignalen lassen sich auch arbiträre Signale erzeugen. Dies ist insbesondere für das 3D-Schneiden von Interesse. Die kurzen Sprungantwortzeiten von 2 Millisekunden werden besonders beim Laserbohren und in Strukturierungsapplikationen genutzt. Die maximale Amplitude der Fokusverschiebung wird im Wesentlichen durch die Brennweite des Bearbeitungskopfes beeinflusst, siehe Abbildung 1 und ist vergleichbar mit Linsenschiebenden Systemen.

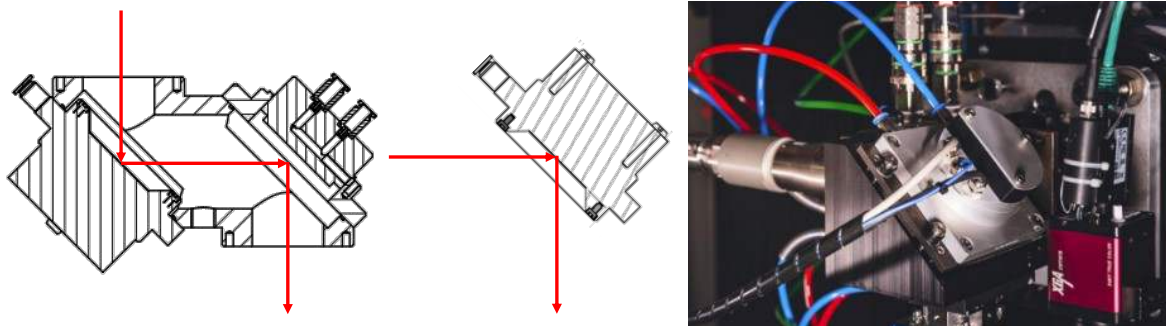


Abbildung 2: mögliche Anordnung der Zwobbel®-Technologie, Links: Prinzipdarstellung einer 180 °-Ausführung mit gekühlten Umlenkspiegel, Mitte: Prinzipdarstellung einer: 90 °-Ausführung, Rechts: Integration einer 90°-Ausführung in einen Bearbeitungskopf

Einsatz beim Laserschneiden

Die dynamische Strahlformung in Strahlausbreitungsrichtung steht dem Markt erst seit kurzem zur Verfügung und das Hauptaugenmerk ihrer Anwendung liegt bisher auf dem Laserstrahlschneiden. Der Einsatz der Zwobbel®-Technologie beim Laserschmelzschneiden zeigt vielversprechende Ergebnisse. Untersuchungen mit einer Laserleistung von bis zu 8 kW im Blechdickenbereich von 0,5 mm bis 10 mm haben gezeigt, dass eine signifikante Steigerung der Schnittgeschwindigkeit um bis zu 50 % bei gleichbleibender oder verbesserter Schnittkantenqualität möglich ist. Bei Baustahl zeigt sich, dass eine Reduktion der Gratanhaltungen an der Blechunterseite und der Schnittflankenrauheit bei gleichzeitiger Steigerung der Schnittgeschwindigkeit erreichbar ist (vergleiche Abbildung 3).

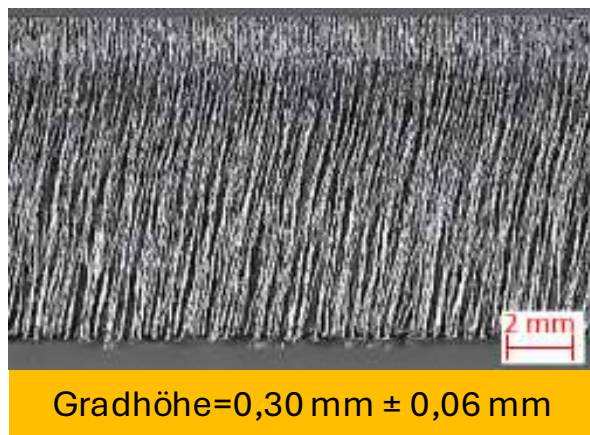
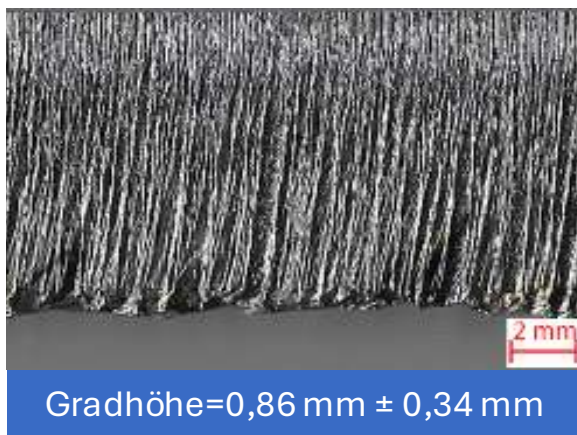


Abbildung 3: S235JR Blechdicke 10 mm mit P=6 kW,
links: ohne Zwobbel® bei v=1,7 m/min, rechts: mit Zwobbel® bei v=2,0 m/min

Mit einem Umsatzanteil von 73 % ist der gesamte CrNi-Markt von Flacherzeugnissen geprägt. Zudem weist der CrNi-Markt nach Baustahl den zweitgrößten Anteil im Bereich der Lasermaterialbearbeitung auf und motiviert Technologie-Erprobungen im Material. Am Beispiel eines 5 mm CrNi-Blechs lässt sich das Potenzial der dynamischen Strahlformung aufzeigen. In diesem Blechsegment ist das Ziel, dass für nachgelagerte Prozesse wie bspw. Schweißen oder Beschichten der Zwischenschritt zur Aufbereitung der Schnittkanten entfällt, was eine hohe Schnittkantenqualität motiviert.

In Abbildung 4 sind die Schnittergebnisse mit und ohne Zwobbel®technologie, bei 8 kW Laserleistung, gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass ohne Qualitätseinbußen eine Steigerung der Schnittgeschwindigkeit um 50 % erreichbar ist. Zudem zeigen die bisherigen Untersuchungen,

dass eine Absenkung des Gasdrucks von bis zu 30 % nicht zu Geschwindigkeitseinbußen und Qualitätsverlust führt, wenn die dynamische Strahlformung verwendet wird. Legt man das gesamte Einsparpotenzial für die beiden Beispiele zugrunde, amortisieren sich die Investitionskosten für die Zwobbel®-Technologie nach 2-5 Monaten.

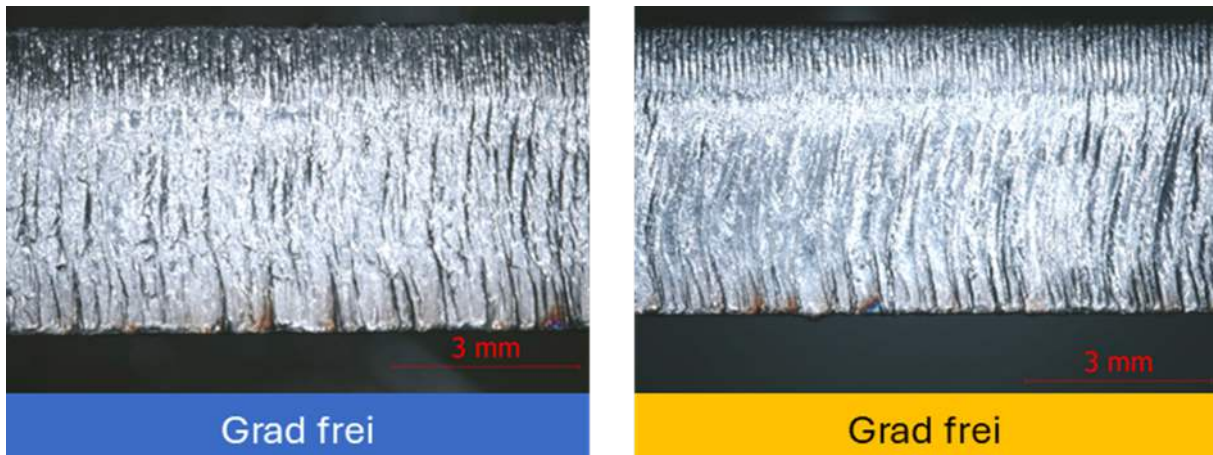


Abbildung 4: X5CrNi18-10 Blechdicke 5 mm mit P=8 kW, links: ohne Zwobbel® bei v=3,5 m/min, rechts: mit Zwobbel® bei v=7,75 m/min

Vor allem im Bereich des Fasenschneidens ist das Erreichen einer gleichbleibenden Qualität der Schnittkant eine Herausforderung. Die physikalisch bedingte Komplexität des Schneidprozesses, bspw. die Gaseinkopplung, erhöht sich beim Fasenschnitt bedeutsam. Unmittelbar wirkt sich dies auf den Schmelzaustrieb aus und somit auf die Schnittqualität. Anhand eines unter 45° geschnittenen CrNi-Stahl mit einer Blechstärke von 10 mm ist die Leistungsfähigkeit der dynamischen Stahlformung gut erkennbar. Bei einer Laserleistung von 6 kW ist keine signifikante Steigerung des Vorschubs möglich, jedoch eine signifikante Steigerung der Schnittflankenqualität. Ein Gradfreier Schnitt ist nur mit der Zwobbel®-Technologie im gezeigten Beispiel (Abbildung 5) möglich. Zudem sank die Schnittflankenrauheit.

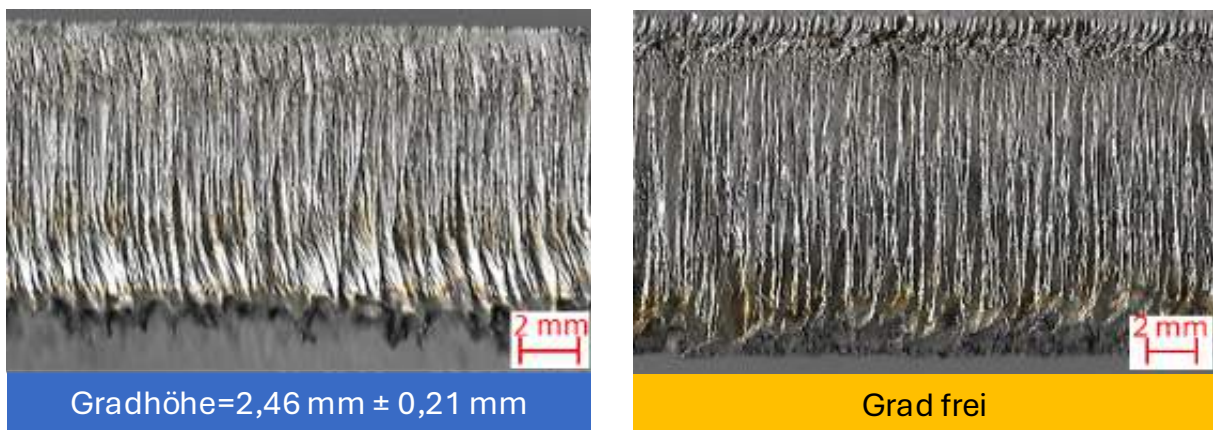


Abbildung 5: X5CrNi18-10 Blechdicke 10 mm mit P=8 kW, v=1,4 m/min, links: ohne Zwobbel®, rechts: mit Zwobbel®

Beim Schneiden von Dünoblech mittels Roboter ist der limitierende Faktor häufig die schlechte Zugänglichkeit. Eine Vergrößerung des Düsenabstandes würde Zugänglichkeit und Flexibilität in der Prozessführung verbessern. Das Werkzeug der dynamischen Strahlformung führte zu einem experimentell nachgewiesenen Vergrößerung des Düsenabstandes um den Faktor 4. Darüber hinaus konnte die Technologie mit einem kommerziellen Schneidrobotersystem positiv evaluiert werden (Abbildung 6).

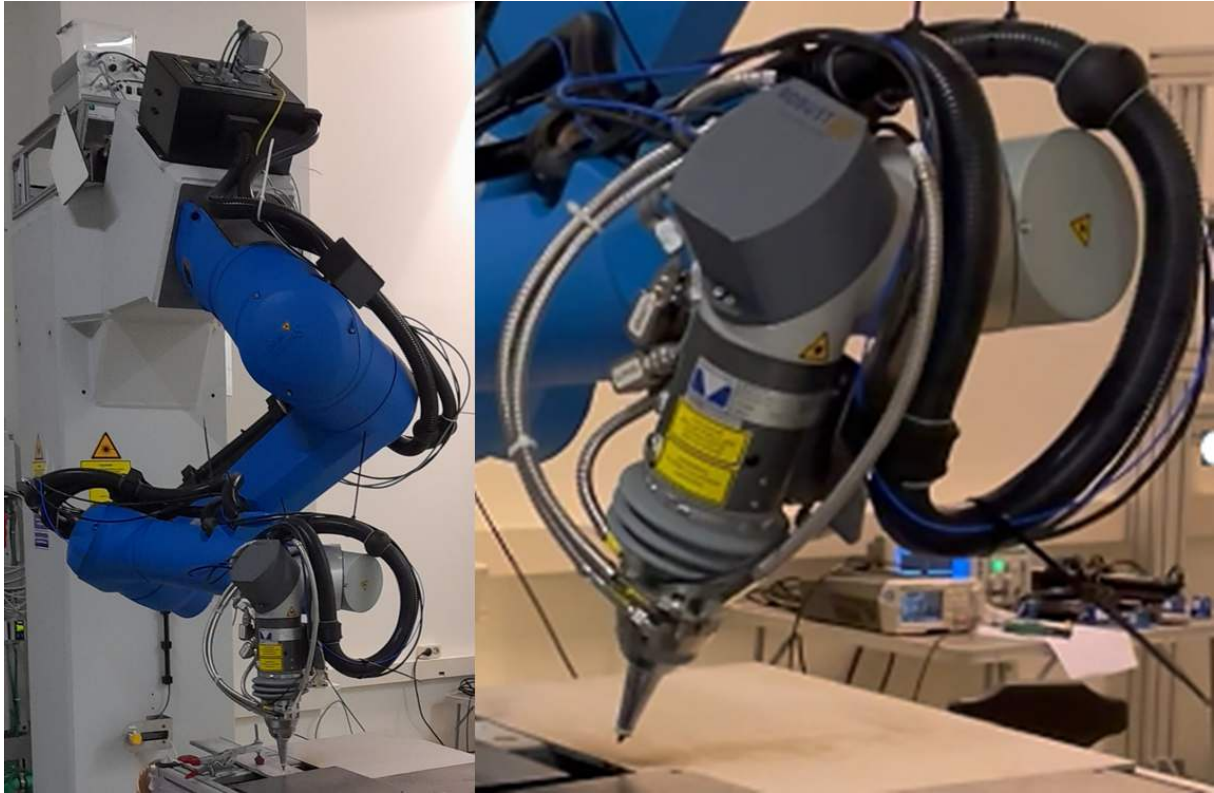


Abbildung 6: Integration in einen kommerziellen Faserlaserschneidroboter.

Der Maschinenbauer Laservorm GmbH integrierte die Technologie in seine Bearbeitungsanlagen LV Midi im letzten Jahr, so dass diese schon im industriellen Maßstab verfügbar ist.

Fazit und Ausblick

Die dynamische Strahlformung in der Ebene wird bereits erfolgreich im Bereich der Lasermaterialbearbeitung eingesetzt. Mit der Zwobbel®-Technologie steht ein Tool zur Verfügung, um die dynamische Strahlformung auf die Strahlausbreitungsrichtung zu erweitern bzw. zu ergänzen. Ihre Leistungsfähigkeit hat sie bereits im Bereich des Laserstrahlschmelzschnidens unter Beweis gestellt. Sie ermöglicht eine Steigerung der Produktivität und verbessert die Schnittqualität. Zukünftige Untersuchungen umfassen die Ausweitung auf höhere Materialstärken und das Laserbrennschneiden.

Die Faserlasertechnologie in Kombination mit adaptiver Optik erweitert die Prozesstechnologie durch dynamische Strahlformung in einer bis zu drei Ebenen und stellt somit einen bedeutenden Fortschritt in der Makro-Lasermaterialbearbeitung dar. Sie bietet eine effiziente Lösung für die steigenden Anforderungen der Fertigungsindustrie.