

## Laser hoher Strahlqualität: Technik und Anwendungen

Wolfram Rath

Rofin-Sinar Laser GmbH Hamburg

### 1 Einleitung

Seit nun über 30 Jahren werden Laser erfolgreich in der Fertigung eingesetzt und sind in vielen Anwendungsbereichen in der industriellen Produktion unverzichtbar geworden.

Dabei stellt das Laserschneiden ein wesentliches Segment des Lasermarktes dar. Nicht nur metallische Werkstoffe werden „gelasert“, sondern auch Holz (Stanzformen für die Verpackungsindustrie), Textilien (Airbags) und Kunststoffe.

Die zweite wesentliche Anwendung des Lasers in der Produktion ist das Laserschweißen. Dabei ermöglicht der Tiefschweißeffekt das effiziente Schweißen mit minimalem Wärmeeintrag. Als Beispiele seien hier Komponenten des automobilen Antriebsstrangs, Einspritzdüsen, Sensorgehäuse und Karosserieelementen angeführt.

Diese genannten Anwendungen, das Laserschneiden und Laserschweißen, schöpfen ihr anwendungstechnisches Potential im wesentlichen aus der hohen Lokalität des Laserenergieeintrags, d.h. sie profitieren von geringen Fokussdurchmessern erzeugt aus Laserstrahlung mittlerer und hoher Strahlqualität.

Weitere Anwendungen wie das Laserlöten und Wärmeleitschweißen, die Oberflächenverfahren wie Härten und Auftragsschweißen sind eher flächiger Natur und arbeiten vorwiegend mit größeren Fokusabmessungen, so dass für diese Verfahren häufig eine hohe Strahlqualität nicht erforderlich, manchmal sogar von Nachteil ist. In diesen Fällen werden u.a. Diodenlaser eingesetzt, die Laserleistung sehr effizient bei geringen Fokussierbarkeitsanforderungen zur Verfügung stellen.

Neben der Laserleistung und der Wellenlänge des Lasers spielt also die Fokussierbarkeit oder – mit anderen Worten die Strahlqualität – eine bedeutende Rolle bei der Auswahl für ein spezifisches Aufgabenspektrum in der Produktion.

#### 1.1 Strahlqualität und Laserfokus

Ein Laserstrahl propagiert nicht als paralleler divergenzfreier Strahl, sondern folgt einer so genannten Strahlkaustik: der Strahldurchmesser verändert sich bei der Strahlausbreitung gemäß einer hyperbolischen Funktion beschrieben durch die Parameter Strahltaillienradius und Fernfelddivergenz. Das Produkt dieser beiden Größen wird als Strahlparameterprodukt (Einheit mm x mrad) zur Beschreibung der Strahlqualität verwendet. Es bleibt bei Kollimierung oder Fokussierung konstant und beschreibt neben der Strahlausbreitung vor allem die Parameter Fokussdurchmesser und Tiefenschärfe. Ebenfalls zur Anwendung kommt die normierte Angabe der Strahlqualität als K-Zahl mit 1 als optimalem Wert.

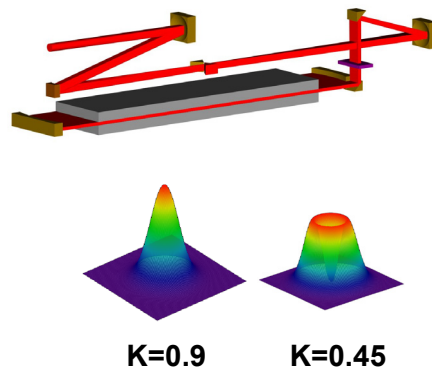
Bessere Strahlqualitäten, beschrieben durch geringere Strahlparameterprodukte, erlauben kleinere Fokussdurchmesser oder größere Tiefenschärfen. Beides sollte auf die Anwendung abgestimmt sein: Nicht immer sind die kleinsten Schnittspalte oder die geringste Schweißnahtbreite die Lösung eines Fertigungsproblems. Typische Fokussdurchmesser für Makro-Aufgaben betragen ca. 0,1 mm bis 0,6 mm, die Tiefenschärfe sollte einige mm betragen.

## 2 Laser

Rofin Laser MACRO bietet zwei Lasertypen mit hoher Strahlqualität an:

Die diffusionsgekühlten CO<sub>2</sub>-Slab-Laser bis 8 kW Laserleistung mit 3,75 mm x mrad (optional 7,5 mm x mrad) als CO<sub>2</sub> Laser und die Yb:YAG Scheibenlaser bis 4 kW mit einer Strahlqualität von 8 mm x mrad.

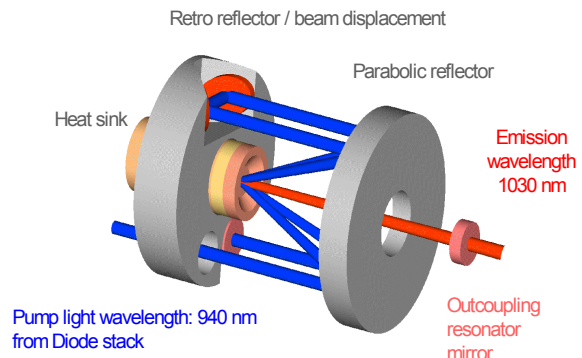
CO<sub>2</sub>-Slab-Laser arbeiten ohne Gasumwälzung, sind daher prinzipiell sehr kompakt, wartungsarm und zeichnen sich durch höchste Verfügbarkeit und minimalen Gasverbrauch aus. Mehr als 3000 ausgelieferte Laser mit Leistungen über 1 kW verrichten ihren Dienst in der automatisierten Produktion. Die Laser werden mit zwei verschiedenen Strahlqualitäten geliefert, als Gauss Mode mit 3,75 mm x mrad (K=0,9) und als Donut Mode mit 7,5 mm x mrad (K=0,45).



**Bild 1:** CO<sub>2</sub>-Slab-Laser DC 080, Prinzip und Ausgangsintensitätsverteilungen

Festkörperlaser bieten gegenüber den CO<sub>2</sub> Lasern den Vorteil, dass die Leistung aufgrund der Wellenlänge von ca. 1µm über flexible dünne Lichtleitfasern an das Werkstück geführt werden kann.

Scheibenlaser sind diodengepumpte Yb:YAG-Festkörperlaser. Die effizientere flächige Kühlung der dünnen Scheibe führt zu einem hohen Steckdosen-Wirkungsgrad bei gleichzeitig verbesserter Strahlqualität gegenüber anderen Konzepten. Aufgrund ihres Aufbaus sind diese Laser unempfindlich gegen Rückreflexionen vom Werkstück und können mit langen Übertragungsfasern betrieben werden. Das integrierte Stackmanagement verhindert ungeplante Serviceeinsätze und gewährleistet eine hohe Verfügbarkeit. Ein Austausch von Diodenstacks ist vor Ort in kürzester Zeit möglich.



**Bild 2:** Diodengepumpter Scheibenlaser hier 3 kW Ausgangsleistung (ROFIN DS 030 HQ)

### 3 Laserschneiden

Laserschneiden ist eine der bedeutendsten Laseranwendungen. Holz und Kunststoffe werden fast ausschließlich mit CO<sub>2</sub>-Lasern geschnitten, da dessen Wellenlängen hierfür am besten geeignet sind. Gerade beim Schneiden geringer Materialstärken bietet die hohe Strahlqualität den Vorteil geringer Schnittfugenbreiten und hoher Schneidgeschwindigkeiten. Auch Schneidanwendungen im Scannerbetrieb profitieren von der hohen Strahlqualität beispielsweise für das Schneiden abrasiver Papiere für Schleifscheiben.

Beim Schneiden von Stahl unterscheidet man zwischen Laserbrennschneiden mit Sauerstoff als Schneidgas, das im Wesentlichen für Baustähle eingesetzt wird, und dem Laserschmelzschneiden mit Stickstoff unter hohem Druck.

#### 3.1 Laserbrennschneiden

Die maximale Schneidgeschwindigkeit der Laserbrennschnitte ist nicht nur von der Laserleistung, sondern auch vom Verbrennungsvorgang bestimmt. Steigert man die Laserleistung für eine bestimmte Materialstärke, so nimmt die Schneidgeschwindigkeit weniger als proportional zu, bis eine maximale Schneidgeschwindigkeit erreicht ist. Daher bietet eine größere Laserleistung die Möglichkeit größere Blechstärken sicher zu schneiden, der Gewinn an Schneidgeschwindigkeit gegenüber leistungsschwächeren Lasern ist jedoch nicht sehr groß. CO<sub>2</sub>-Slab Laser erreichen auf Grund ihrer hohen Strahlqualität im Blechstärkenbereich bis etwa 6 mm höhere Schneidgeschwindigkeiten oder benötigen geringere Laserleistungen als Laser schlechterer Fokussierbarkeit. Dieser Vorteil schränkt die Schneidbarkeit dicker Baustahlbleche bei höheren Laserleistungen nicht ein. Die hohe Strahlqualität macht sich auch durch die geringere Divergenz der Strahlausbreitung bemerkbar, die eine größere Konstanz der Fokusparameter bei Systemen mit fliegender Optik gewährleistet.

Die Wellenlängen der Festkörperlaser werden besser von den Metallen absorbiert als die der CO<sub>2</sub>-Laser. Dies hat zwei Konsequenzen: Erstens wird beim Schneiden geringer Materialstärken bis etwa 3 mm eine größere Schneidgeschwindigkeit erreicht als mit dem CO<sub>2</sub>-Laser bei gleichzeitigem verringertem Laserleistungsbedarf. Zweitens wird beim Schneiden größerer Blechstärken eher mehr Leistung benötigt als mit dem CO<sub>2</sub>-Laser.

### 3.2 Laserschmelzschneiden

Naturgemäß spielt die Stahlverbrennung beim Schmelzschneiden keine Rolle. Die Schneidgeschwindigkeit nimmt mit der Laserleistung in weiten Bereichen linear zu. Auch hier sind Prozessgrenzen beobachtbar, die mit dem Schmelzfluss und -austrieb zusammenhängen.

Laser höherer Strahlqualität erreichen aufgrund der geringeren Schnittspaltbreite höhere Schneidgeschwindigkeiten. Größere Blechstärken erfordern andererseits eine breitere Schnittfuge, damit der Schneidgasstrahl eine ausreichende Eindringtiefe in die Fuge besitzt. Die Fugenbreite ist also durch geeignete Fokussierung einzustellen.

Laser der Wellenlängen um  $1\mu\text{m}$  erreichen wie beim Brennschneiden höhere Effizienzen im Dünoblechbereich bis etwa 3mm im Vergleich zu  $\text{CO}_2$ -Lasern. Bei größeren Blechstärken erzielen sie jedoch nicht die mit  $\text{CO}_2$ -Lasern hergestellte Kantenqualität in Bezug auf Rauigkeit und Gratfreiheit, was mit der höheren Absorption auf der Schneidfront zusammenzuhängen scheint.

## 4 Schweißen

Das Lasertiefschweißen durch Erzeugung einer Dampfkapillare, erlaubt aufgrund des sehr effizienten Energieeintrags in die Tiefe das Erzeugen von tiefen schlanken Schweißnähten, die verzugsarmes Schweißen mit minimaler thermischer Belastung der Bauteile erlaubt. Hohe Schweißgeschwindigkeiten, eine vorzügliche Automatisierbarkeit und die Möglichkeit der Online Qualitätsbeobachtung während des Prozesses machen das Laserschweißen zu einem weit verbreiteten Fügeverfahren in der modernen industriellen Fertigung.

Für das Laserschweißen gelten folgende Gesetzmäßigkeiten:

- Die Querschnittsfläche der Schweißnaht ist proportional der Streckenenergie, d.h. dem Quotienten aus Laserleistung und Schweißgeschwindigkeit
- Man unterscheidet zwei Geschwindigkeitsbereiche:  
Bei geringer Schweißgeschwindigkeit nimmt die Einschweißtiefe mit der Laserleistung nahezu unabhängig von der Fokusgröße zu.  
Bei höheren Schweißgeschwindigkeiten skaliert die Einschweißtiefe mit dem Quotienten aus Laserleistung und Fokusdurchmesser.
- Für die Nahtform ist die Tiefenschärfe und die Fokusslage von Bedeutung

Laser höherer Strahlqualität, die kleinere Fokusdurchmesser erzeugen können, sind also in der Lage schlankere, tiefere Schweißnähte zu herzustellen.

Festkörperlaser erreichen aufgrund der besseren Absorption höhere Effizienzen im Bereich geringerer Einschweißtiefen.

In der Praxis wird die Wahl der Schweißnahtgeometrie nicht immer durch die höchste Tiefe und geringste Breite bestimmt. Vielmehr gilt es einen Kompromiss zwischen Wärmeeintrag und Bauteiltoleranzen zu finden, der eine kostengünstige Fertigung mit hoher Zuverlässigkeit ermöglicht. Außerdem werden häufig Fügegeometrien gewählt, bei denen die Schweißnahtbreite die Verbindung zwischen den Fügepartnern herstellt und somit schmalere Nähte zu einer Verringerung der Festigkeit führen.

Eine noch relativ junge Technik ist dabei sich einen Teil der Blechfügeprozesse zu erobern: Das Laserschweißen mit hochdynamischen Ablenssystemen (Dynamic Beam Welding), das eine flexible Vielpunkt-Bearbeitung in einem großen Arbeitsraum zulässt. Bei diesem Verfahren handelt es sich um ein Hochgeschwindigkeitssysteme zur Erzeugung vieler Laserschweißgeometrien mit zu vernachlässigender Schweißnebenzeit, weil die Verfahrbewegung zwischen den Schweißungen, bezeichnet als "rapid move", mit extrem hohen Geschwindigkeiten durchgeführt werden. Man unterscheidet dabei Remote-Schweißen mit CO<sub>2</sub>-Lasern und Scanner Schweißen mit Festkörperlasern.

#### 4.1 Remote-Schweißen

Für den wirtschaftlich sinnvollen Einsatz eines Remote Schweißsystems (Remote Welding System = RWS) sind CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaser von mehr als 3 kW mit hoher Strahlqualität ( $< 5 \text{ mm} \times \text{mrad}$ ) notwendig, da nur die hohe Strahlqualität einen entsprechend großen Arbeitraum erlaubt. Mit Laserleistungen von 3,5 kW bis 6 kW aus CO<sub>2</sub>-Slab-Lasern und einer Fokussierbrennweite von 1,6 m – 2 m resultiert ein Arbeitsraum in der Form eines Pyramidenstumpfes mit einer Grundfläche von 1800 mm x 2600 mm. Damit können selbst große Bauteile wie z.B. PKW-Türen in nur einer Aufspannung an den verschiedensten Stellen geschweißt werden. Als Schweißkonturen sind neben Punkten beliebige Nahtformen, wie beispielsweise Stepp-, Kreis-, Halbkreis-, Kreuz- und Wellennähte, herstellbar.

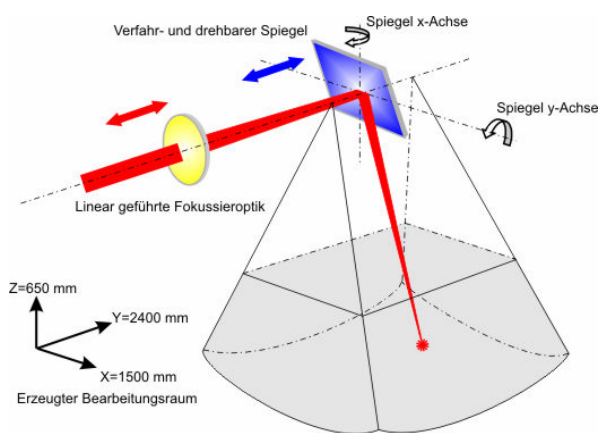


Bild 3: Remote-Schweißsystem (ROFIN RWS)

#### 4.2 Scanner-Schweißen

Wird das Bearbeiten einer Aufgabe mit dem RWS nicht möglich weil die Zugänglichkeit des Strahls durch Schattenbildung behindert ist oder das Laserwerkzeug in die Konstruktion eintauchen muss, so lässt sich dies mit dem Scannerschweißen (Scanner Welding System = SWS) im Vorbeiflug lösen.

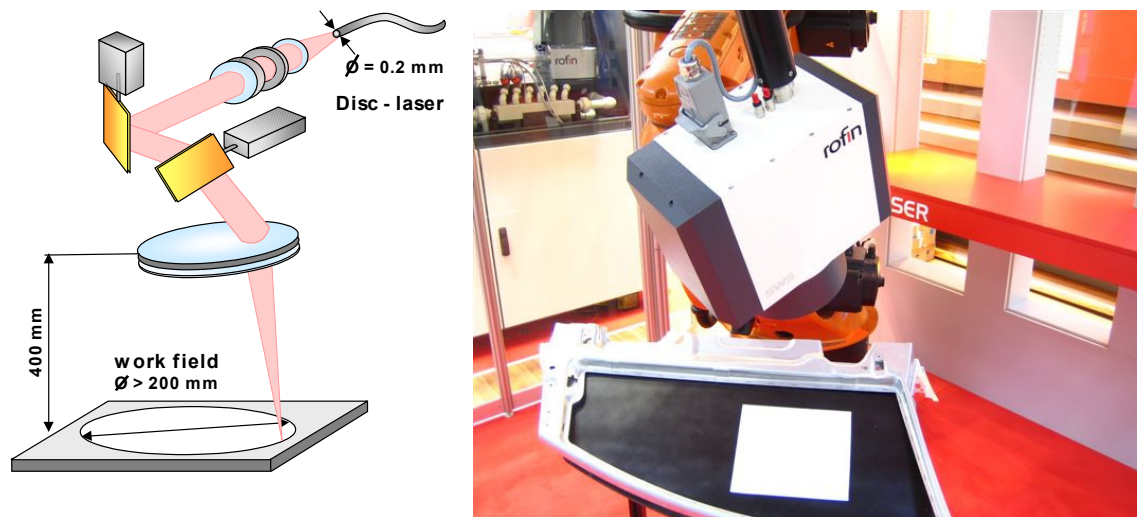


Bild 4: Scanner-Schweißen mit Scheibenlaser

Der Strahl eines Festkörperlaser wird in diesem Konzept über zwei galvanometrisch bewegte Drehspiegel abgelenkt und anschließend auf das Werkstück fokussiert. Damit ermöglicht die Scanner-Optik eine Positionierung des Laserstrahls über komplexen Bauteilen mit höchster Geschwindigkeit. Eine integrierte Steuerung erlaubt das einfache Programmieren und Optimieren der spezifischen Konturen unter Berücksichtigung der Roboterbewegung. Durch die Überlagerung der Roboterbahn und der Scannerkonturen lassen sich die Roboterbewegungen minimieren und die Zykluszeiten drastisch reduzieren. Laser höherer Strahlqualität erlauben größere Arbeitsabstände die jedoch eine höhere Genauigkeit der Roboterbewegung und eine schlechtere Zugänglichkeit bei Umorientierungen zur Folge haben.

## 5 Laserauswahl

Mit den beschriebenen Laserkonzepten CO<sub>2</sub>-Slab Laser und Scheibenlaser stehen zwei Strahlquellen der Wellenlängenbereiche 10  $\mu\text{m}$  und 1  $\mu\text{m}$  zur Verfügung, die den Aufgaben für die vielfältigen Anwendungen in der industriellen Produktion sowohl im Hinblick auf die Leistung als auf die Strahlqualität gerecht werden. Weitere entscheidende zusätzliche Gesichtspunkte für den praktischen Einsatz der Laser sind noch zu beachten:

- Das Maschinenkonzept d. h. Spiegelführung oder Lichtleitfaser
- Das Sicherheitskonzept: der Aufwand für die Abschirmung eines Festkörperlaser ist höher als der für einen CO<sub>2</sub> Laser
- Die Kostenbetrachtung für Investition und Betrieb.

Vielfach stellt sich bei Berücksichtigung aller Faktoren der CO<sub>2</sub>-Slab Laser als die beste Möglichkeit heraus, einen Laserprozess in die Fertigung zu integrieren.