

Vier Gründe warum *konventionelles Laserschneiden* niemals das Leistungsvermögen des *wasserstrahlgeführten Lasers* erreichen wird.

Die Kombination von Wasser - und Laserstrahl hat das Arbeitsgebiet des Präzisionsschneidens revolutioniert. Der Laser Microjet®, der die technische Umsetzung dieses Konzeptes ist, wird heutzutage in zahlreichen Industriezweigen, wie zum Beispiel im Halbleiter -, Elektronik -, Medizin , Energie und Automobilssektor, eingesetzt. Synova ist der Erfinder des wasserstrahlgeführten Lasers und hat ihn zu einem leistungsstarken Schneidwerkzeug weiterentwickelt.

Die innovative Technologie des Laser Microjet® sollte nicht mit dem konventionellen Laser gleichgesetzt werden (Tab.1). Tatsächlich existieren einige gravierende Unterschiede zwischen dem wasserstrahlgeführten und dem herkömmlichen Laser, welche die deutlich verschiedenen Resultate hinsichtlich der Schnittqualität erklären. Diese fundamentalen Unterschiede resultieren allein aus der Technologie, dem Einsatz von Wasser als Lichtwellenleiter.

Im konventionellem Laserschneiden wird der Laserstrahl direkt auf das Werkstück fokussiert. Der Laserstrahl ist sowohl vor, als auch nach der Fokusebene konisch. Der Laser trägt das Material ab durch Erhitzen im Fokus, wo die Intensität hoch genug ist. Schneidgas, koaxial zum Laserstrahl, treibt die Schmelze aus der Schnittfuge.

Bei dem wasserstrahlgeführten Laser wird der Laserstrahl in eine Wasserstrahldüse fokussiert. Das Laserlicht wird in dem laminaren Wasserstrahl durch Totalreflexion auf das Werkstück geleitet. Dort wird das Material durch die Laserstrahlung erhitzt und abgetragen. Der Wasserstrahl kühlt das Werkstück zwischen den einzelnen Laserpulsen und treibt gleichzeitig die Schmelze aus der Schnittfuge.

Aus diesen wesentlichen Prozessunterschieden lassen sich vier wichtige Konsequenzen für das Schnittresultat ableiten. Diese heben den wasserstrahlgeführten Laser deutlich von allen anderen lasergestützten Schnitttechnologien ab.

Tab.1: Vergleich zwischen konventioneller - und wasserstrahlgeführter Lasertechnik

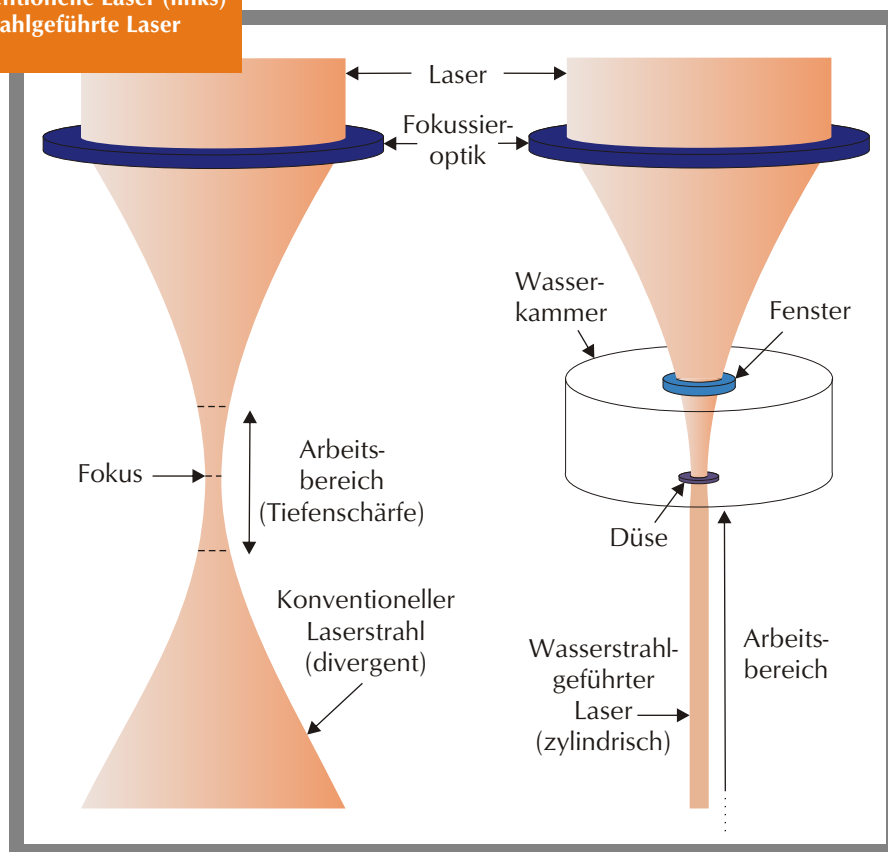
	Konventioneller Laser	Wasserstrahlgeführter Laser
Strahlform	Konischer Strahl	Paralleler Strahl
Wärmeeinfluss	Wärmeeinflusszone	Vernachlässigbarer Wärmeeinfluss
Materialaustrieb	Uneffizient (mit Gas)	Effizient (mit Wasser)
Verunreinigungen	Partikel verunreinigen Oberfläche	Partikel werden abgespült

① Paralleler Laserstrahl

Jeder Lichtstrahl ist divergent. Dies bedeutet, dass paralleles Licht in der Natur nicht existiert. Laser, selbst mit der bestmöglichen Strahlqualität, sind divergent. Sogenannte beugungsbegrenzte Laser ($M^2 = 1$) werden eventuell in der Zukunft für hohe Leistungen zur Verfügung stehen. Trotzdem muss das Laserlicht noch immer fokussiert werden zur Erzeugung der notwendigen Leistungsdichten, um das Material aufzuschmelzen und

perfekte Geometrie ohne Variationen des Durchmessers auf. Diese Distanz beträgt das 1000fache des Wasserstrahldurchmessers. Folglich ist der Arbeitsbereich, der tatsächlich zum Materialabtrag nutzbar ist, 100mal länger als beim konventionellem Laserschneiden. Während diese Laser bei bestimmten Materialdicken versagen, erreicht der wasserstrahlgeführte Laser ein Vielfaches der Schnittfugentiefe verglichen mit dem konventionellem Laserschneiden.

Abb. 1: Konventionelle Laser (links) und wasserstrahlgeführte Laser (rechts)



abzutragen. Die Tiefenschärfe (der Bereich um den Fokus, indem Materialablation möglich ist) ist, je nach Laser und Fokussierung, begrenzt auf einige hundert Mikrometer oder einige wenige Millimeter.

Der Wasserstrahl, mit dem der Laser zum Werkstück geleitet wird, ist zylindrisch und erzeugt somit einen parallelen Laserstrahl mit dem gleichen Durchmesser wie der Fokus. Dies ist nur aufgrund der Lichtwellenleitereigenschaft des Wasserstrahls möglich. Der Wasserstrahl weist in dem stabilen Bereich einer bestimmten Länge eine

Diese besondere, künstlich herbeigeführte Strahlgeometrie ist eine Revolution für sich. Diese Tatsache ist sehr interessant für eine Vielzahl von Anwendungen die sehr hohe Prozessgenauigkeiten erfordern und zwar aus folgenden Gründen:

1. Es ist nicht länger notwendig den Arbeitsabstand zu kontrollieren;
2. Nahezu parallele Schnittkanten;
3. Schmale parallele Schnittfugen auch in dicken Materialien;
4. Und schließlich die Möglichkeit sowohl poröse, als auch Sandwich - Strukturen zu schneiden.

② Kühlung

Bei der Nutzung von Laserstrahlquellen (sichtbarer oder infraroter Wellenlängenbereich), wird Material durch lokale Erhitzung ablatiert. Im cw Mode (kontinuierlichen Modus, also nicht gepulst), der z.B. zum Schneiden von Metallblechen genutzt wird, kommt es zu einer starken thermischen Belastung des Materials, die eine Präzisionsbearbeitung ausschließt. Der Einsatz gepulster Laserstrahlung reduziert diese thermische Belastung, nichts desto trotz bringt jeder Laserpuls zusätzlichen Wärmeeintrag mit sich, mehr als zum Materialabtrag notwendig ist. Diese schnelle Erhitzung, auf die das Schneidgas nahezu keinen Einfluss hat, wirkt sich auf das umgebende Material aus und führt zur so genannten Wärmeeinflusszone (WEZ).

mit diesen Lasern erzielten Ergebnisse genau so gut sind, hinsichtlich Schnittgeschwindigkeit und Qualität, wie die Resultate, die mit dem Laser Microjet® beim Volumenabtrag bereits erreicht wurden.

Der Wasserstrahl kühlt die Schnittkanten auf die denkbar effektivste Art und Weise. Nach jedem Laserpuls kühlt das Wasser augenblicklich den erhitzten Bereich und verhindert somit unnützen Wärmeeintrag in den Festkörper. Die Strömungsgeschwindigkeit des Wasserstrahls ist dabei so hoch, dass selbst bei einer Pulsfolgefrequenz von 100kHz der erwärmte Bereich ausreichend zwischen den Pulsen gekühlt wird, indem erhitztes

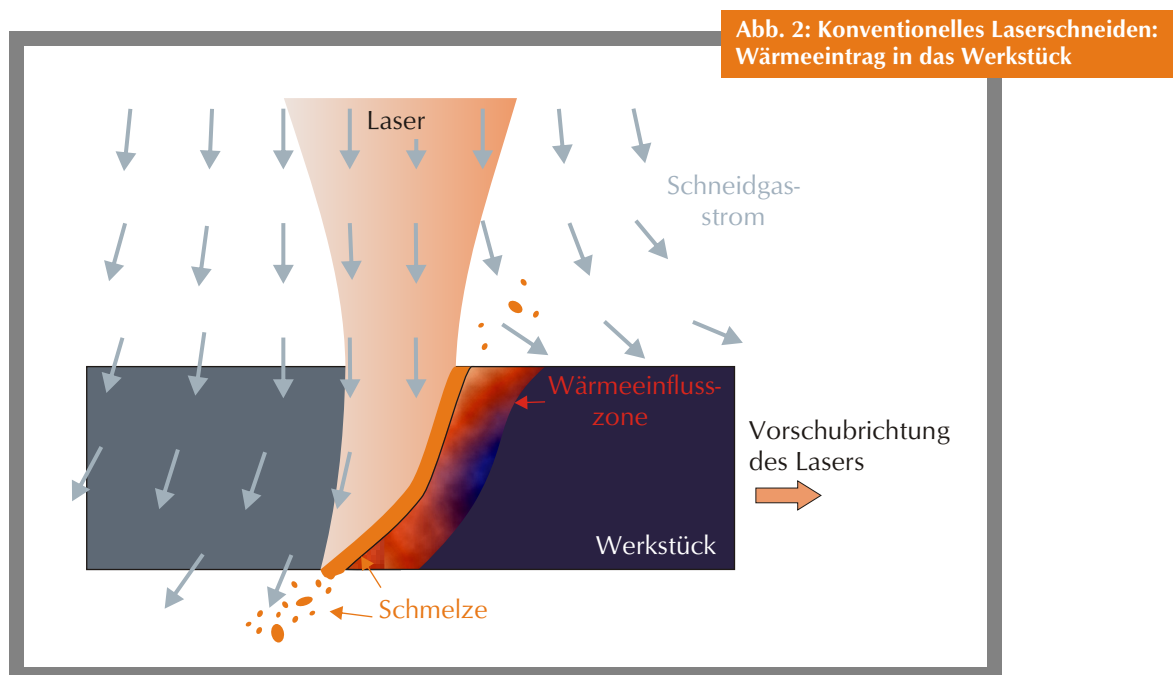


Abb. 2: Konventionelles Laserschneiden: Wärmeeintrag in das Werkstück

Der Einsatz von Laserstrahlquellen mit kürzeren Wellenlängen und Pulsdauern reduziert diesen Effekt, allerdings nicht ausreichend. Nutzt man Pulsdauern im Bereich von Piko und Femtosekunden (10^{-12} s bis 10^{-15} s) handelt es sich beim dem Materialabtrag fast ausschließlich um Photo Ablation, ohne Erwärmung. Aber da die mittlere Leistung dieser teuren Laser sehr gering ist, ist auch die Abtragsrate entsprechend niedrig. Selbst wenn Hochleistungs-Kurzpulslaser erhältlich wären, wäre die resultierende Prozessgeschwindigkeit gering. Grund dafür ist die Tatsache, dass wesentlich mehr Energie für das Verdampfen des Materials notwendig ist, verglichen mit dem Aufschmelzen. Weiterhin ist nicht sicher, dass die

Material sofort ausgetrieben wird. Die Temperatur der Schnittkante wird sehr schnell auf die Temperatur des Wassers gekühlt. Die Konsequenz daraus ist, dass praktisch keine WEZ erzeugt wird. Nur die Kantenoberfläche der Schnittfuge ist thermisch beeinflusst, ohne jedoch in den Festkörper hineinzureichen. Die negativen Effekte der Erhitzung, wie zum Beispiel Mikrorisse, Oxidation, Strukturveränderungen oder reduzierte Bruchfestigkeit treten nicht auf.

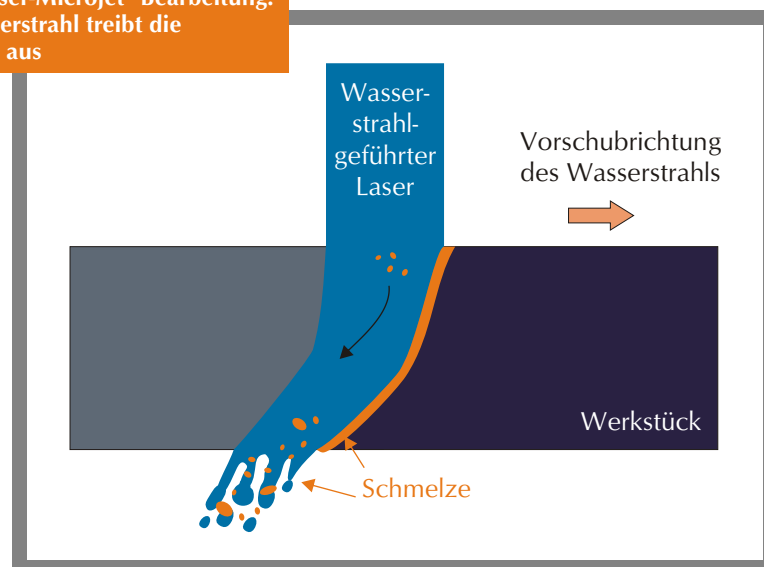
③ Materialaustrieb

Das grundlegende Prinzip für den Materialabtrag mit Laserstrahlung ist das Aufschmelzen des Materials. In der Umgebung des auftreffenden Laserstrahls schmilzt der Werkstoff auf oder verdampft aufgrund der Absorption des Lichtes. Das aufgeschmolzene Material muss dann aus der Schnittfuge ausgetrieben werden.

Im konventionellem Laserschneiden wird dies mit einem Gasstrom realisiert, der auf einen Maximaldruck von 20bar begrenzt ist, da sonst die Kraft auf das Werkstück zu groß ist. Nur ein kleiner Teil des Arbeitsgases dringt tatsächlich

der konventionellen Technik mit dem Gasstrahl. Dies liegt am kleineren Durchmesser des Wasserstrahls, verglichen mit dem Gasstrom. Somit wird der gesamte Wasserstrahl zum Materialaustrieb genutzt. Die kinetische Energie des Wasserstrahls, der die Schnittfuge passiert, ist wesentlich höher als die des Gasstroms. Die Konsequenz daraus ist ein um 800mal effizienterer Materialaustrieb mit dem Wasserstrahl, verglichen mit der herkömmlichen Technik. Dies erlaubt insbesondere bei der Bearbeitung von dünnen Materialien deutlich höhere Schnittgeschwindigkeiten als mit der konventionellen Lasertechnik.

Abb.3: Laser-Microjet® Bearbeitung:
Der Wasserstrahl treibt die Schmelze aus



in die Schnittfuge ein und trägt zum Schmelzaustrieb bei. Auf Grund seiner geringen Dichte und der Komprimierbarkeit ist der Gasstrom keine sehr effiziente Methode zum Schmelzaustrieb.

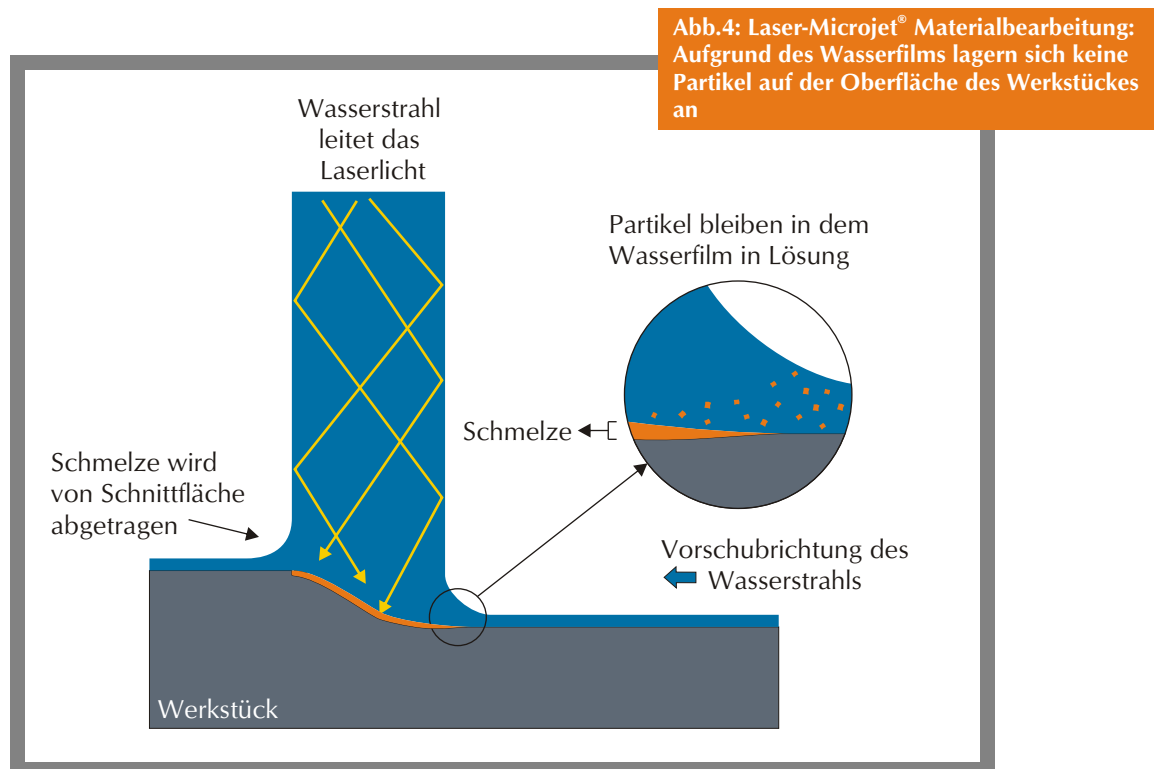
In der Laser-Microjet Technologie kann der Wasserstrahl- druck bis zu 500 bar betragen. Trotzdem ist die resultierende Kraft auf das Werkstück viel kleiner als bei

In Zukunft könnte der kommerzielle Einsatz von Lasern mit kürzeren Wellenlängen und Pulsen den Anteil der Materialverdampfung erhöhen und somit die Bedeutung des effektiven Materialaustriebes aus der Schnittfuge reduzieren. Jedoch ist der Energieaufwand zur Materialverdampfung wesentlich größer, verglichen mit dem Schmelzprozess, was diese Methode letztendlich ineffizient für den Volumenabtrag macht.

④ Sauberkeit

Ist das Material aus der Schnittfuge ausgetragen, gibt es noch einen letzten Aspekt der in Betracht gezogen werden muss, um hochqualitative Schnitte zu erreichen, nämlich das Vermeiden von Partikelrückständen auf der Oberfläche des Materials. Tatsächlich haben Untersuchungen gezeigt, dass selbst beim Schneiden im Vakuum und bei der Materialbearbeitung unter Verwendung der Photoablation (und somit sehr geringer Prozesseffizienz) ein Teil des abgetragenen Materials auf der Oberfläche, durch aerodynamische Effekte im verdampfenden Material, abgelagert wird. Der Einsatz von Kurzpulslasern reduziert diese Ablagerungen, auf Kosten der erreichbaren Prozesstiefe und der Effizienz. Zusätzlich sind die mit diesen Lasern erreichten Werte noch immer unakzeptabel für das Schneiden von besonders empfindlichen Materialien wie zum Beispiel Silizium.

So sind bei dem Einsatz des wasserstrahlgeführten Lasers wesentlich weniger Partikel über die Oberfläche verteilt, da der Wasserstrahl das ablatierte Material direkt von der Oberfläche abträgt. Die absolute Reinheit der Oberfläche wird jedoch durch einen anderen Effekt erreicht: der Wasserfilm auf dem Werkstück stellt einen perfekten, sehr preiswerten Schutzfilm dar. Schmelzpartikel die in den Wasserfilm gelangen werden sofort abgekühlt, erstarren im Wasser, werden weggespült und können somit nicht auf der Oberfläche haften bleiben. Zusätzlich ist der Wasserfilm noch eine Säuberungsmethode für das Werkstück. Die bearbeiteten Werkstücke sind nach dem Prozess mit dem wasserstrahlgeführten Laser meist sauberer als vorher. Es ist unmöglich, einen Wasserfilm beim konventionellen Laserschneiden zu verwenden, da dieser eine Irregularität im Brechungsindex darstellt und somit die präzise Kontrolle der Energiedichte des Laserstrahls auf dem Werkstück verhindert (Diagramm 2).



Die einzige Möglichkeit, um Ablagerungen mit diesen Verfahren zu vermeiden, ist das Aufbringen von Schutzschichten. Jedoch ist der völlige Verzicht auf solche zusätzlichen Prozessschritte zu bevorzugen, da diese immer einen Anstieg der Kosten und einen zusätzlichen Technikaufwand zur Folge haben.

Konventionelles Laserschneiden kommt zur Zeit nicht ohne aufwendige Nachbearbeitung oder zusätzliche Prozessschritte aus, wenn es das Niveau an Reinheit, das mit Laser Microjet® erzielt wird, erreichen soll. Weiterhin ist es unwahrscheinlich, dass zukünftige Entwicklungen in der konventionellen Lasertechnik diesen wichtigen Aspekt des Ablationsprozesses zu Gunsten der konventionellen Lasertechnik nennenswert verbessern werden.

Zusammenfassung

Seit seiner Erfindung vor 11 Jahren, wurde der Laser Microjet® kontinuierlich von Synova, dem Unternehmen das alle Rechte an den technischen Entwicklung hält, weiterentwickelt. Dies führte dazu, dass der Laser Microjet® heute zu dem effektivsten Werkzeug unter den lasergestützten Schneidtechnologien geworden ist. Durch den Einsatz von Wasser wurde der Prozess des Laserschneidens zu einer vollkommen neuen Technik, deren Charakteristika sehr verschieden zum konventionellen Laserschneiden sind.

Paralleles Laserlicht, vernachlässigbarer Wärmeeintrag in das Werkstück, effizienter Schmelzaustrieb und keine

Verunreinigung durch Partikel sind die vier wesentlichen Vorteile, die aus der Kombination von Wasserstrahl und Laser resultieren. Diese außergewöhnlichen Eigenschaften garantieren dem wasserstrahlgeführten Laser eine lange Zukunft und einen festen Platz unter den fortschrittlichsten und wichtigsten Technologien zur Materialbearbeitung.

Mit seiner außerordentlichen Schnittqualität ist der Laser Microjet® eine Alternative im Gebiet der Präzisionsschneidtechnik, dem konventionellen Laser bei weitem überlegen; auch mit zukünftigen Entwicklungen wird die konventionelle Lasertechnik nicht in der Lage sein, diesen Vorsprung aufzuholen.

Synova SA, September 2004