

# Lasermikrobearbeitung mit kompaktem 20 W Kurzpuls-Faserlaser

Die Erzeugung kurzer Laserpulse im Nano- und Femtosekunden-Bereich gehört bei Faserlasersystemen mit geringer Pulsenergie inzwischen zum Stand der Technik. Kommerzielle Systeme sind in unterschiedlichen Varianten umfangreich auf dem Markt verfügbar. Durch hohe Repetitionsraten erreichen selbst kompakte Systeme mittlere Leistungen von mehreren 10 W und werden somit für die industrielle Mikro-Materialbearbeitung interessant: Durch die geringe Wärmeinkopplung ergeben sich gute Bearbeitungsqualitäten und es können zudem thermisch empfindliche Materialien wie Kunststoffe oder Keramiken bearbeitet werden. Die kurze Interaktionszeit zwischen Strahl und Werkstoff ermöglicht einen definierten Tiefenabtrag und aufgrund nichtlinearer Absorption – bedingt durch die hohe Pulsspitzenleistung – ist auch die Bearbeitung vieler transparenter Materialien möglich. Dadurch ergeben sich zahlreiche Anwendungen zum Schneiden, Strukturieren, Markieren oder auch selektiven Abtragen (z. B. Reinigen).

Allgemein erhöht sich die Bearbeitungsqualität mit kürzeren Pulsdauern durch steigenden Anteil der Materialverdampfung, zugleich sinkt jedoch der Volumenabtrag und somit die Wirtschaftlichkeit.

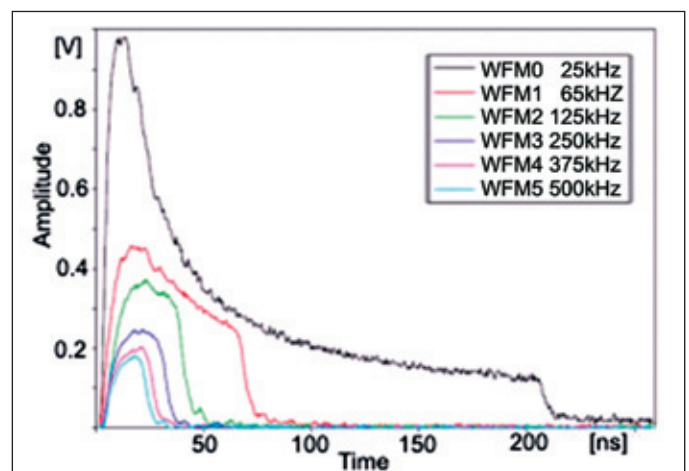
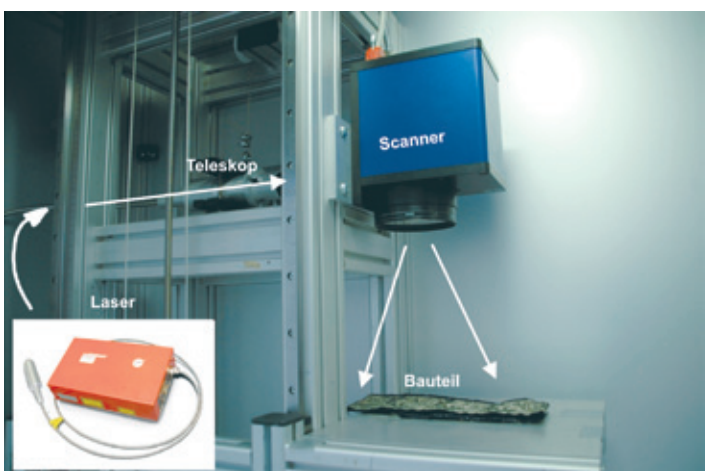
Kompakte ns-Faserlasersysteme stellen dabei durch niedrige Investitionskosten und ausreichend geringen Wärmeeintrag einen guten Kompromiss dar und lassen sowohl den Einsatz in bestehende Laserapplikationen als auch die Erschließung neuer Märkte möglich erscheinen. Einschränkungen

ergeben sich allerdings auch hier durch die geringe mittlere Leistung von wenigen 10 W. Die Strahlung muss auf kleine Fokusbereiche, typischerweise  $<50 \mu\text{m}$ , fokussiert werden, um ausreichende Intensität für einen Materialabtrag zu erreichen. Somit lassen sich nur geringe Volumina pro Zeit bearbeiten, was bei größeren Schnittbreiten oder -tiefen unwirtschaftlich werden kann.

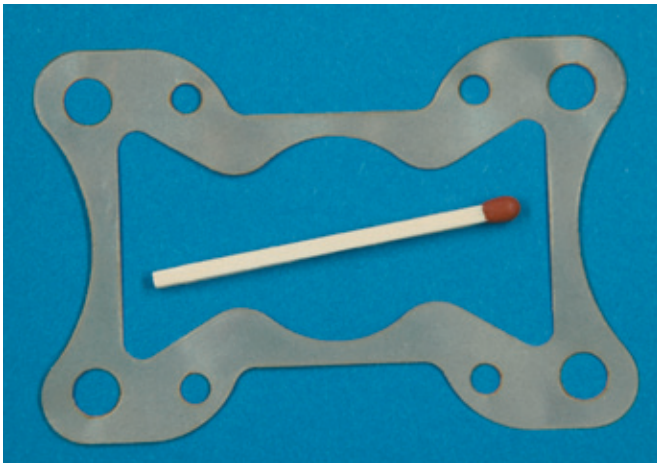
Die Kombination aus niedriger Pulsenergie und hoher Repetitionsrate legt für die Materialbearbeitung den

Einsatz einer Scanneroptik nahe. Für eine umfangreiche Erprobung wurde im Laserzentrum der FH Münster ein ns-Faserlasersystem als universelle Materialbearbeitungsanlage konzipiert und aufgebaut. Der installierte Faserlaser (SPI, G3, 20 W,  $\lambda = 1065 \text{ nm}$ ) ermöglicht hierbei auch eine Variation der Pulsform und somit indirekt unterschiedliche Pulsdauern zwischen 9 bis 200 ns, was neue Vergleichsmöglichkeiten eröffnet. Vereinfacht werden Parameterstudien dadurch, dass mit der für den adaptierten Scanner (Raylase, SuperScan 15) installierten Software zugleich auch alle Laserparameter gesteuert werden können.

Auf der Werkstückoberfläche wird mit dem F-Theta Objektiv ( $f = 163 \text{ mm}$ ) ein Fokus von  $25 \mu\text{m}$  erzeugt. Bei maximaler Scangeschwindigkeit von 7 m/s und 500 kHz Pulsfolgefrequenz ergibt sich somit ein Versatz von  $14 \mu\text{m}$  zwischen zwei Pulsen. Dieser Überlappungsgrad von 56 % genügt bei der zur Verfügung stehenden Leistung von 20 W für die wenigsten Anwendungen. Daher muss entweder mit niedrigeren Scangeschwindigkeiten oder einer Vielzahl von Scanzyklen gearbeitet



▲ Erprobungsanlage mit SPI-Faserlaser G3/20 W und Scanner-System (links). Mittels Variation der Pulsform kann bei diesem System Einfluss auf die Pulsdauer genommen werden (rechts, Quelle: Firma SPI Lasers)



▲ Quasi-Simultan lasergeschnittene Formdichtung aus 0,3 mm Edelstahlfolie (links) und technische Keramik Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (t = 0,25 mm, rechts)

werden. Auch ist die maximale Repetitionsrate nicht zwingend am effektivsten, da ab einer spezifischen Grenzfrequenz – je nach Pulsdauer – nicht mehr die maximale Pulsspitzenleistungen erreicht werden kann. Die folgenden Beispiele sollen praxisrelevante Resultate für typische Applikationen aufzeigen.

### Laserbeschriftung

Zur Laserbeschriftung wurden Edelstahl und eloxiertes Aluminium eingesetzt. Auf beiden Materialien konnten optisch ansprechende Ergebnisse erzielt werden. Die Eloxalschicht der Aluminiumoberfläche wurde mit 1 bis 1,5 m/s bei 20 W und 20 kHz vollständig abgetragen. Eine übliche Anlassbeschriftung auf Edelstahl konnte bei den gleichen Laserparametern noch mit 2,5 m/s erreicht werden. Durch eine geschickte Variation aller Parameter können des Weiteren unterschiedliche Anlassfarben erzielt werden. Ein signifikanter Tiefenabtrag für eine Gravur benötigte jedoch Geschwindigkeiten von 0,5 bis 1 m/s und etwa 40 Scann-Wiederholungen für 100 µm Tiefe. Insgesamt liegen die Ergebnisse etwa auf dem Niveau eines diodengepumpten Nd:YAG-Beschriftungslasers dieser Leistungsklasse.

### Laserschneiden und -bohren

Ein interessantes Aufgabenfeld für Faserlaser dieser Kategorie liegt im

Trennen von Materialien in Form von Folien bis etwa 0,3 mm. Durch die Möglichkeit, hohe Pulsfolgefrequenzen mit hohen Ablenkgeschwindigkeiten des Scanners zu kombinieren, bietet sich hier die »Quasi-Simultan-Bearbeitung« an.

Dabei wird die gewünschte Schnittkontur sehr schnell (typ. 3-5 m/s) einige 100- bis 1000-mal abgefahren. Somit werden die auftretenden thermischen und mechanischen Belastungen gleichmäßiger verteilt, es ergibt sich weniger Verzug und eine minimierte Scherbelastung. Edelstahlfolie der Dicke 0,1 mm konnte so extrapoliert mit einer Geschwindigkeit von 5 mm/s nahezu verzugsfrei geschnitten werden. Ohne den Einsatz von Schutzatmosphäre weist die Schnittkante allerdings leichte Oxidation auf. Technische Keramiken können aufgrund des geringen Wärmeeintrags rissfrei geschnitten werden. Die Schnittgeschwindigkeiten liegen hier bei etwa 1,5 mm/s für Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mit 0,25 mm Materialdicke. Selbst transparente Kunststofffolien wie Polyimid lassen sich problemlos schneiden. Die Schnittländer sind frei von Anschmelzungen, weisen aber geringe sichtbare Spuren von Karbonisierung auf.

Identische Ergebnisse konnten beim Bohren erzielt werden, die Durchmesser lagen mit 20 bis 35 µm im Bereich des Fokus.

In Edelstahlfolie (t = 50 µm) konnten

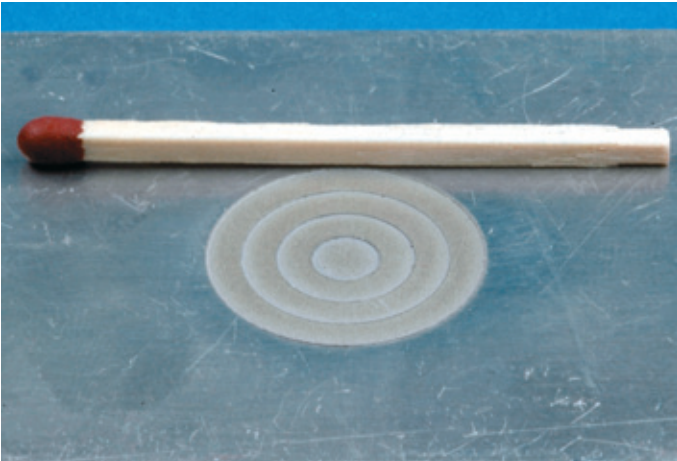
100 Bohrungen pro Sekunde erstellt werden.

### Strukturieren von Oberflächen

Applikationen beim Strukturieren von Oberflächen beziehen sich häufig auf das Erstellen von Nuten. Dies wird auch bei der Solarzellenherstellung durchgeführt, um einzelne Bereiche elektronisch voneinander zu separieren. Darüber hinaus können komplexere Geometrien zur Generierung von Oberflächentopografien erzeugt werden. Hier ist lateral die Auflösung durch den Fokus und vertikal durch die Tiefenschärfe limitiert. Der Abtrag liegt leistungsbedingt unterhalb von 1 mm<sup>3</sup> pro Sekunde, bei Aluminium wurden beispielsweise 0,06 mm<sup>3</sup>/s ermittelt. Somit sind wirtschaftlich relevante Fertigungsprozesse stark eingeschränkt, dennoch kann diese Methode eine interessante Alternative für kleine Strukturflächen insbesondere bei geringen Stückzahlen oder Prototypen darstellen.

### Selektiver Schichtabtrag

Die sehr kurze Interaktionszeit mit dem Substrat ermöglicht einen selektiven Abtrag von Schichten, wie er bei der Laserreinigung oder zur Prozessvorbereitung bei einigen Fertigungstechniken notwendig ist. So konnten mit dem vorliegenden Lasersystem problemlos Stahloberflächen entrostet oder entlackt werden. Selbstver-



▲ Per Faserlaser eingebrachte Tiefenstruktur in Aluminium,  $\varnothing = 20 \text{ mm}$ ,  $t = 200 \text{ }\mu\text{m}$

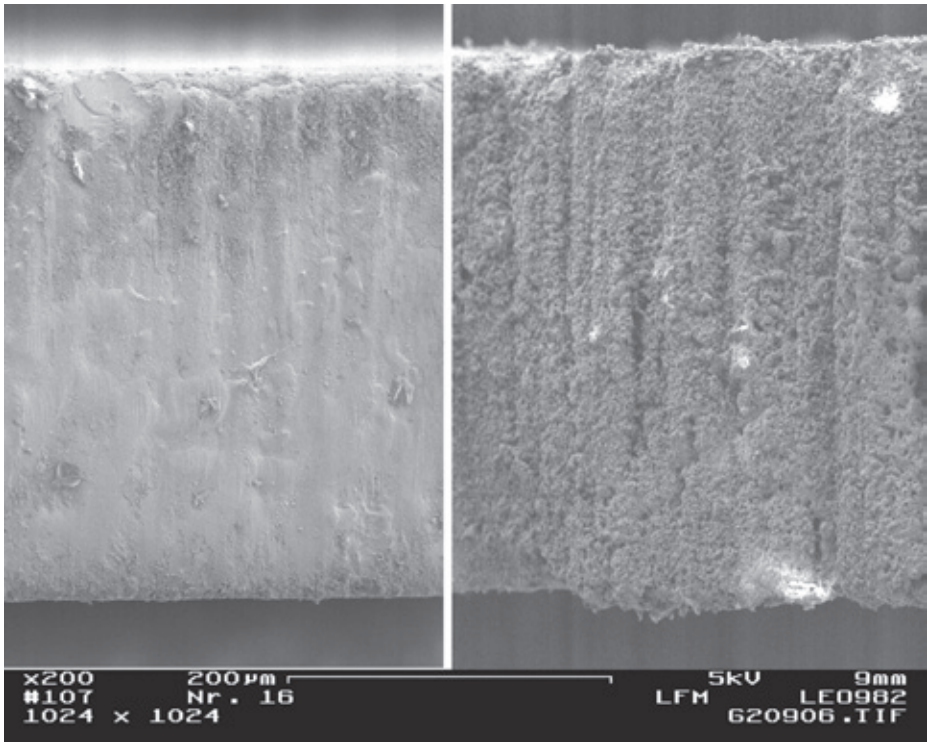
ständig mit geringen Abtragungsgeschwindigkeiten von 0,1 bis 0,3  $\text{cm}^2/\text{s}$ , aber ohne thermische Einwirkung auf den Grundwerkstoff. Dieses konnte auch anschaulich an Beispielen aus dem Bereich Kunst- und Kulturgüter demonstriert werden. Erst wenn die Schichtdicken eine intensivere Behandlung mit mehreren Laserpulsen pro Fläche benötigen, kommt es zu einer merklichen Erwärmung der Oberfläche.

### Vergleich unterschiedlicher Pulsdauern

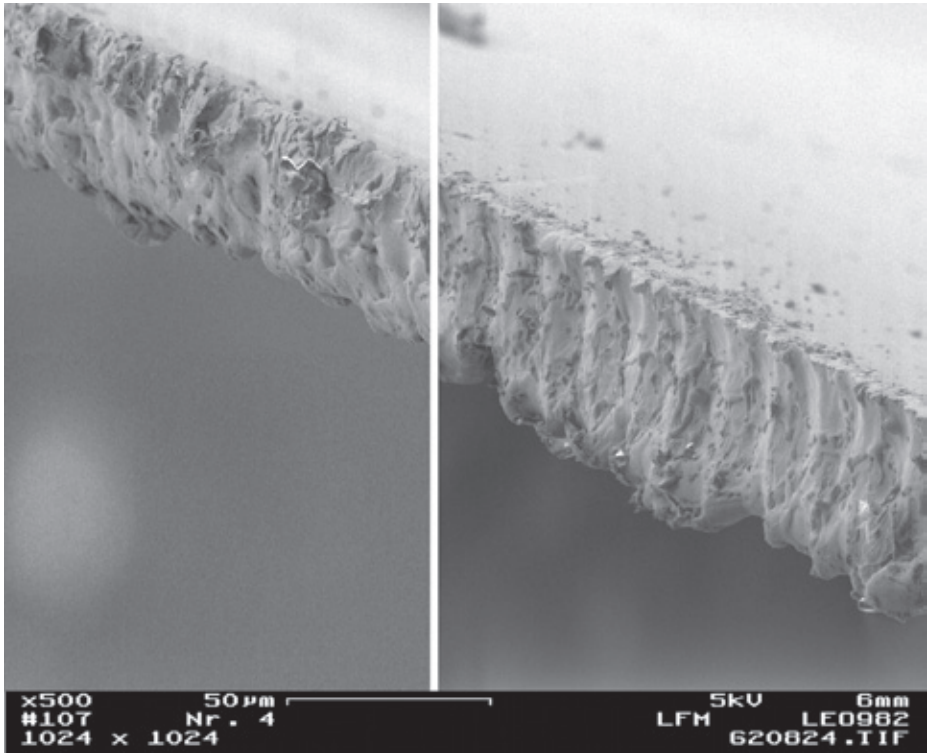
Die Pulsdauer kann bei dem vorliegenden System schrittweise von 9 bis 200 ns variiert werden, dabei sind kürzere Pulsdauern nur mit sinkenden Pulsspitzenleistungen möglich. Allerdings kann zugleich die Frequenz erhöht werden, wodurch die mittlere Leistung konstant bei 20 W gehalten werden kann. Durch diese Art des »Pulseforming« in festgelegten Stufen können keine grundlegend unterschiedlichen Bearbeitungseigenschaften erzielt werden, es handelt sich jederzeit um ein Kurzpulssystem im ns-Bereich mit entsprechenden Möglichkeiten und Einschränkungen. Jedoch ist über die Wahl der Pulsform – und somit der Pulsdauer – eine Optimierung möglich, welche mikroskopisch betrachtet signifikant ausfallen kann. So wird die Rauheit der Schnittkante bei Silizium bspw. mit kurzen Pulsdauern wesentlich verringert.

Wird hochlegierter Stahl mit einer Pulsdauer von 200 ns geschnitten (»Quasi-Simultan-Bearbeitung« mit 1000 mm/s und 20 Scannzyklen), ergibt sich eine leichte Schmelz- und Riefenbildung, die zu einem kleinen, erstarrten Schmelzgrad an der Unterseite führt. Diese Effekte sind bei einem Schnitt mit 9 ns kaum mehr vorhanden, wobei die Reduzierung der Riefenbildung zugleich durch eine höhere Puls-wiederholfrequenz unterstützt wird.

Bei Ployimid (Kapton) konnte hingegen keine signifikante Verbesserung der Schnittkante verzeichnet werden. Jedoch ist es allgemein bei Kunststoffen möglich, mit der kürzesten Pulsdauer weniger Wärmeeinwirkung zu erzie-



▲ Per Faserlaser geschnittenes Silizium, REM-Bild der Schnittkante; Pulsdauer: 9 ns (links) und 200 ns (rechts), Frequenz: 25 kHz



▲ Per Faserlaser geschnittene Edelstahlfolie, REM-Bild der Schnittkante; links: Pulsdauer 9 ns, Frequenz 100 kHz; rechts: Pulsdauer 200 ns, Frequenz 25 kHz

dicke auf 0,5 mm beschränkt wird, können die meisten Metallwerkstoffe sowie auch Kunststofffolien und teilweise Keramiken bearbeitet werden. Durch Pulse im ns-Bereich sind selektiver Materialabtrag und somit Oberflächenstrukturierungen realisierbar. Über die Wahl optimaler Parameterkombinationen inkl. Pulsform können gute Resultate mit geringem Wärmeinfluss erzielt werden. Bei einer Ausgangsleistung von 20 W müssen jedoch Abstriche bei der Bearbeitungs geschwindigkeit gemacht werden, sodass sich diese Leistungsklasse überwiegend für Applikationen mit insgesamt wenig Volumenabtrag eignet.

Bei der Abnahme von µm-Schichten oder »Quasi-Simultan-Bearbeitung« sind dennoch hohe Verfahrensgeschwindigkeiten erforderlich, wodurch sich die Kombination mit einer Scanner-Ablenkeinheit als optimal erweist. Der Durchmesser des Fokus auf der Materialoberfläche und damit die kleinste erzielbare Strukturgröße ist dabei durch Wellenlänge ( $\lambda=1065$  nm), Apertur des Scanners und Brennweite der F-Theta-Optik gegeben. Bei der beschriebenen Anlage liegt die Fokusgröße bei 25 µm, das Bearbeitungsfeld bei 110 × 110 mm<sup>2</sup>. Somit kann dieses Konzept für bestimmte Anwendungen eine echte Alternative zu oftmals wesentlich aufwendigeren und kostenintensiveren Systemen darstellen.

■ INFO

Autoren:  
Prof. Dr.-Ing. Klaus Dickmann,  
Jens Hildenhagen

Kontakt:  
Prof. Dr.-Ing. Klaus Dickmann  
Fachhochschule Münster  
Fachbereich Physikalische Technik  
Raum: F 24  
Stegerwaldstraße 39  
48565 Steinfurt  
Tel: 02551 9-62322  
Fax: 02551 9-62490  
E-Mail: dickmann@fh-muenster.de  
www.fh-muenster.de

len, was insbesondere bei Bohrungen relevant ist. Kompakte Faserlaser, wie das getestete 20 W System, können

also durch Pulsdauern im unteren ns-Bereich sehr effektiv diverse Materialien bearbeiten. Sofern die Material-