Zukunft der Medizingerätefertigung

70 Prozent kürzere Zykluszeit in der Lasermikrobearbeitung durch die Wahl der passenden Pulsdauer

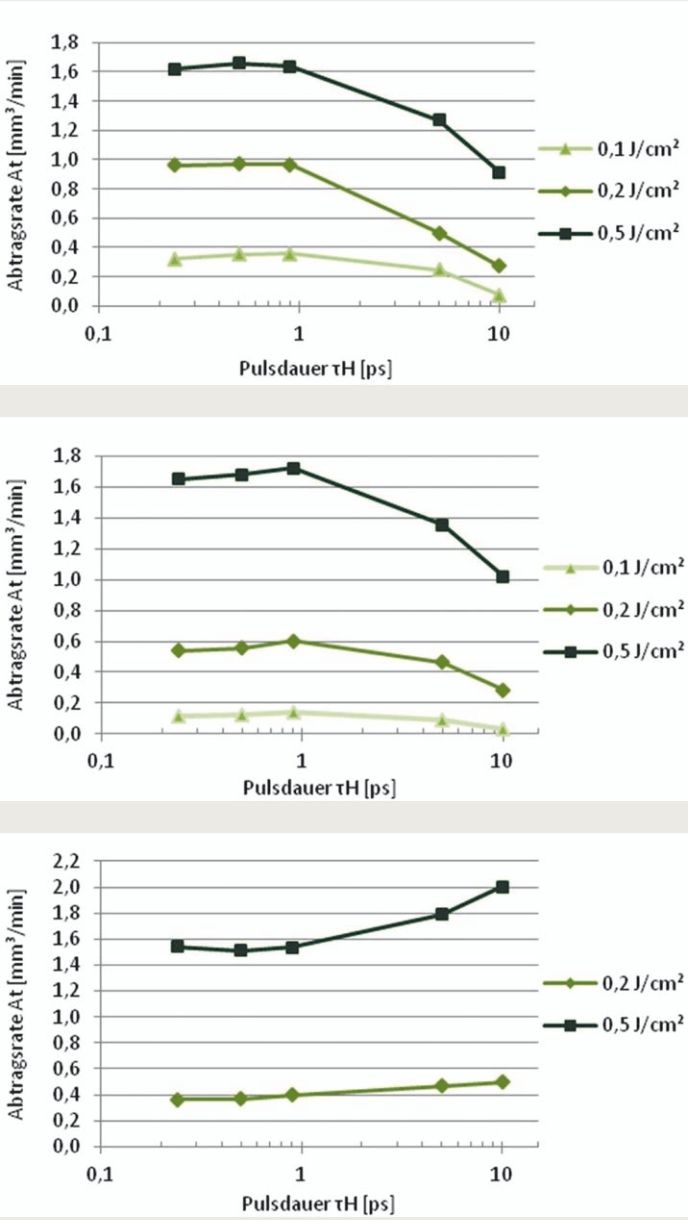

Bild 1: Abtragsrate in Abhängigkeit der Pulsdauer bei 1,1 MHz für Edelstahl 1.4301 (oben), Hartmetall VGH2 (Mitte) und Aluminiumnitrid (unten). Für Metalle ist eine Pulsdauer von 900 fs optimal, für Keramiken 10 ps. Alle Bilder: GFH GmbH

Im Vergleich zu herkömmlichen Fertigungsverfahren wie Fräsen, Drehen und Schleifen ermöglicht die Laserbearbeitung einen deutlich präziseren Abtrag, was insbesondere in der Medizintechnik von großer Bedeutung für die Funktionalität und Zuverlässigkeit sein kann. Allerdings spielt heute meist nicht nur die Präzision eine große Rolle, sondern auch die Wirtschaftlichkeit: Der gewünschte Abtrag soll mit möglichst wenig Zeitaufwand erzielt werden, dabei eine gute Qualität aufweisen und zudem kostengünstig sein. Um dies zu realisieren, ist eine material- und anwendungsbezogene Einstellung der Pulsdauer essentiell, wie Versuche des Laserbearbeitungsexperten GFH GmbH zeigen.

Pulsdauer als wesentlicher Parameter

Die Pulsdauer stellt einen wesentlichen Parameter bei Fertigungsprozessen dar. So liefern Nanosekunden-Pulse beispielsweise eine hohe Abtragsrate bei eingeschränkter Qualität, da der Abtrag hier hauptsächlich über die Schmelzphase erfolgt, wenn das Material aufgrund der langen Einwirkzeit des Lasers schmilzt. Mit Kurzpulslasersystemen im Pikosekunden-Bereich konnte die Qualität bei abtragenden Prozessen signifikant verbessert werden – jedoch auf Kosten einer deutlich längeren Bearbeitungszeit, was den Markteintritt dieser Technologie erschwerte. Die kontinuierliche Weiterentwicklung der Strahlquellen hin zu industriell einsetzbaren Femtosekundenlasern besitzt heute das Potential, einen hohen Abtrag mit guter Qualität zu verbinden. GFH führte daher Untersuchungen durch, um die Effizienz und Qualität von Pulsen im Femtosekunden-Bereich an verschiedenen Materialien zu analysieren.

Tests an verschiedenen Materialien

Für die Versuche wurden unterschiedliche Einstellungen der Parameter Pulsdauer, Pulsenergie sowie Repetitionsrate – das heißt der Dauer der Pause zwischen zwei Pulsen in Hertz – betrachtet. Als Strahlquelle kam ein Laser mit einer maximalen mittleren Leistung von 15 W zum Einsatz, welcher Pulsdauern im Bereich von 240 fs bis 10 ps erzeugen kann. Damit wurden Proben von Edelstahl 1.4301, Hartmetall VGH2 und der Keramik Aluminiumnitrid bearbeitet, woraus die Abtragsrate in der Einheit Kubikmillimeter pro Minute bestimmt und die Qualität unter dem Mikroskop ausgewertet werden konnten.

Ergebnis

Das Ergebnis der Untersuchungen zeigte, dass für Edelstahl durch eine Reduzierung der Pulsdauer von 10 ps auf 900 fs eine Erhöhung der Abtragsrate um den Faktor 3 erreicht werden kann. Bei Keramiken, hier Aluminiumnitrid, wurde das Gegenteil festgestellt. Hier bewirkte eine Erhöhung der Pulsdauer von 900 fs auf 10 ps eine Steigerung der Abtragsrate. Dies bedeutet, für Metalle und Dielektrika existieren unterschiedliche Optimalwerte, was die Pulsdauer betrifft. Durch Wahl der jeweils geeigneten Dauer – für Metalle 900 fs, für Dielektrika 10 ps – können somit bis zu 70 Prozent kürzere Zykluszeiten erzielt werden (Bild 1).

Pulsdauer hat keinen Einfluss auf die Qualität

Neben der Abtragsrate wurden auch Qualität und Oberflächenstruktur betrachtet, da diese für einige Funktionsanforderungen der Bauteile von enormer Bedeutung sind. Im Rahmen der Tests wurde dazu die Abhängigkeit der Qualität von der Pulsdauer untersucht und für verschiedene Fluenzen, sprich Pulsenergie pro Fläche, bei einer Repetitionsrate von 1,1 MHz gegenübergestellt.

Als Resultat zeigte sich auch bei Variation der Pulsdauer eine nahezu gleichbleibende Qualität. Lediglich bei Edelstahl fällt die Oberfläche bei Erhöhung der Pulsdauer auf 10 ps qualitativ schlechter aus. Darüber hinaus wurde bei Erhöhung der Fluenz an allen untersuchten Materialien eine Zunahme der Abtragsrate festgestellt. Allerdings kann die

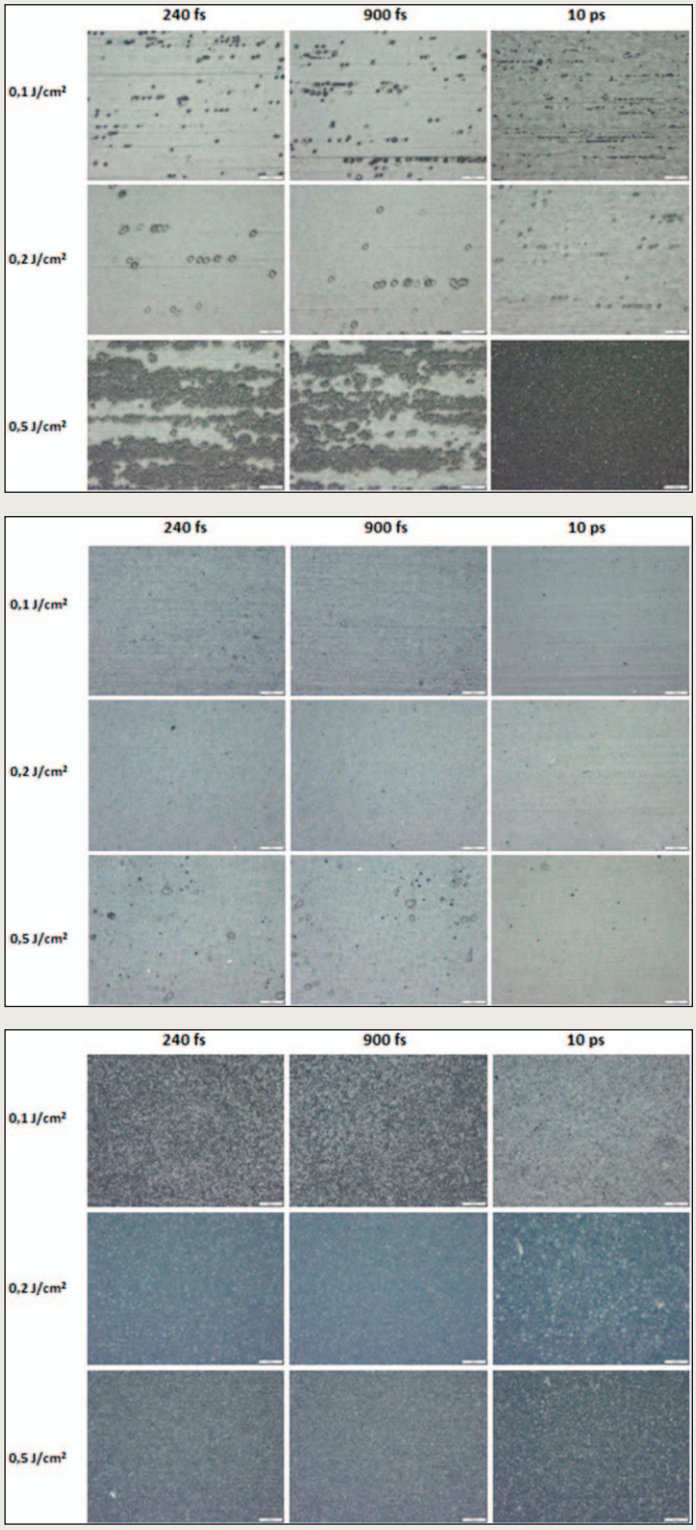

Bild 2: Abtrag von Edelstahl (oben), Hartmetall (Mitte) und Aluminiumnitrid (unten) bei 1,1 MHz, 20-fach vergrößert. Die Qualität des Abtrags ändert sich bei Variantion der Pulsdauer kaum.

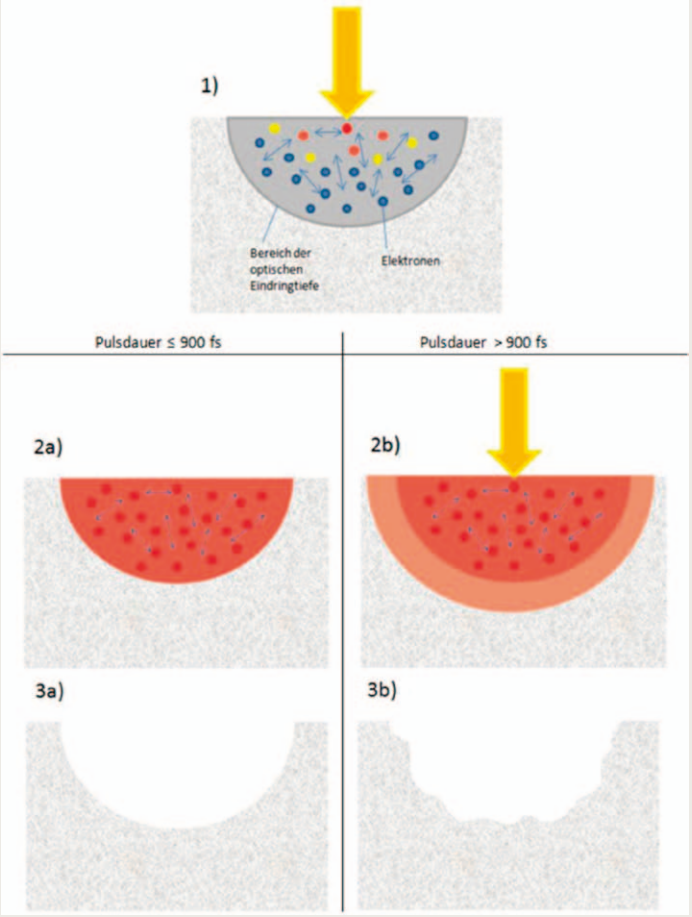

Bild 3: Bei Metallen kommt es zu Aufschmelzungen am Material, falls die Pulsdauer größer als 900 fs gewählt wird.

Fluenz nicht beliebig hoch gewählt werden, da sich die Qualität mit steigendem Wert verschlechtert. Als gute Einstellung hat sich für Edelstahl 0,2 J/cm² ergeben, für Hartmetall und Aluminiumnitrid 0,5 J/cm². Unter Umständen könnten für diese Werkstoffe auch noch höhere Fluenzen verwendet werden, da 0,5 J/cm² der höchste Wert der Untersuchungen war und noch eine gute Qualität erzeugte. Als weiterer Effekt stieg die Abtragsrate bei allen untersuchten Materialien mit der Erhöhung der Repetitionsrate. Jedoch existiert auch hier ein Optimum, eine zu hohe Repetitionsrate wirkt sich auf Grund von Wärmeakkumulation negativ auf die Qualität aus. In den Tests bewährte sich eine Rate von 1,1 MHz für gute Ergebnisse (Bild 2).

Wahl der richtigen Pulsdauer

Der Einfluss der Pulsdauer auf die Effizienz der Lasermikrobearbeitung resultiert aus den unterschiedlichen Eigenschaften der Werkstoffe: Bei Metallen erwärmt sich das Gitter bei circa 900 fs bis 1 ps nach Beginn des Laserpulses, davor wird lediglich das Elektronensystem heiß. Wird die Pulsdauer größer 900 fs gewählt, so wird dem Material nach dieser Zeitspanne weiter Energie durch den Laserstrahl zugeführt, obwohl das Gitter bereits warm ist. Dies führt zu Energieverlusten an das umgebende Material, wodurch es schmilzt. Bei kurzen Pulsdauern wird dagegen die gesamte Energie des Laserpulses für den Abtrag verwendet, da das Gitter noch nicht erwärmt ist, sondern nur das Elektronensystem. Das Material geht hier ohne zu schmelzen direkt in den gasförmigen Zustand über. Wird jedoch eine kurze Pulsdauer bei hoher Fluenz gewählt, so ergibt sich der gleiche Effekt wie für längere Pulse, das heißt es kommt aufgrund der hohen Energieeinbringung ebenfalls zu Aufschmelzungen des umgebenden Werkstoffs (Bild 3).

Keramiken reagiert anders

Für die optimale Pulsdauer von 10 ps bei Keramiken ist hingegen ein anderer Effekt verantwortlich: Da hier bei niedrigen Fluenzen

Zu bearbeitende Werkstoffe	Pulsdauer	Bearbeitung	Repetitionsrate hoch	Pulsenergie hoch	Investition
Metalle	900 fs	Bohren / Schneiden		X	++
		Abtragen	X		
Dielektrika	10 ps	Bohren / Schneiden		X	+
		Abtragen	X		
Alle Werkstoffe, ohne Kunststoff	variable Pulsdauer, 900 fs – 10 ps	Abtragen / Bohren / Schneiden	X	X	+++

Bild 4: Die erste Grobauswahl des Lasers kann anhand des Werkstoffes und der Bearbeitung erfolgen.

kein Material abgetragen wird, ist für die Bearbeitung viel Energie, also eine höhere Fluenz, erforderlich. Zudem ist Keramik ein guter Wärmespeicher, was bedeutet, dass bei längeren Pulsen das Material stärker erwärmt und die Wärme darin gespeichert wird. Daraus ergibt sich beim nächsten Puls ein größerer Anteil an Energie im Material, Wärme vom ersten Puls summiert sich mit der Energie vom zweiten Puls.

Den richtigen Laser anhand von Material und Bearbeitung bestimmen

Die Untersuchungen mit verschiedenen Werkstoffen haben gezeigt, dass mit der Laserbearbeitung durchaus eine große Effizienz und zugleich eine gute Qualität erreicht werden kann – wenn die zum Material passende optimale Pulsdauer gewählt wird. Somit lässt sich anhand des zu bearbeitenden Materials und der erforderlichen Bearbeitung – Bohren, Schneiden oder Abtragen – bereits eine Grobauswahl des am besten geeigneten Lasers treffen (Bild 4). Zudem ergaben die Untersuchungen, dass eine Pulsdauer kleiner als 900 fs bei keinem untersuchten Material notwendig ist, da hier die Abtragsrate konstant bleibt. Das bedeutet, der Abtrag ist auch in dieser Hinsicht wirtschaftlich, denn je größer die Pulsdauer desto kostengünstiger der Laser. Darüber hinaus sind längere Pulsdauern weniger anfällig bezüglich der Stabilität.

Bild 5: Um eine an das jeweilige Material angepasste Konfiguration zu ermöglichen, sind die Lasermikrobearbeitungsanlagen hinsichtlich der verwendeten Strahlquelle nicht eingeschränkt.

Neben den Parametern Pulsdauer, Pulsenergie und Repetitionsrate gibt es allerdings noch weitere Kriterien für die Auswahl einer passenden Strahlquelle. Dazu zählen unter anderem die Leistungsstabilität, die Pulsstabilität, die Robustheit gegenüber Umgebungsschwankungen, der In-Field-Service, die Mean-Time-Before-Failure (MTBF), die Mean-Time-To-Repair (MTTR) und andere sogenannte Soft-Specs. Um trotz dieser Vielfalt an Anforderungen das für die jeweilige Anwendung geeignetste Lasersystem zu finden, greift GFH auf eine große Wissensbasis und die Erfahrung von mehreren Kilowatt installierter Kurzpulslaserleistung zurück. Da die Anlagentechnik des Unternehmens hinsichtlich der verwendeten Strahlquelle nicht eingeschränkt ist, kann so für den Kunden eine gleichbleibende Systemlösung mit unterschiedlichen Lasersystemen und Konfigurationen je nach Bedarf hergestellt werden.

▶ *GFH GmbH*
info@gfh-gmbh.de
www.gfh-gmbh.com