

Produktive Materialbearbeitung mit kW-UKP-Lasern?

Die Ultrakurzpuls-(UKP)-Laser-Technologie durchläuft zurzeit eine rasante Entwicklung. Dem großen Potential dieser Technologie wurde mit dem Zukunftspreis 2014 öffentlichkeitswirksam Rechnung getragen. In den Labors stehen die ersten UKP-Laser mit mittleren Leistungen über 1 kW. Braucht es die überhaupt? Und wie setzt man diese möglichst effizient ein?

Die ultrakurzen Pulse sind immer dann interessant, wenn sehr präzise bearbeitet werden soll. Die Pulsdauern ≤ 10 ps zusammen mit den möglichen, sehr hohen Intensitäten über 10^{10} W/cm² bewirken, dass das bearbeitete Material nur sehr wenig thermisch belastet wird. Prädestiniert sind UKP-Laser deshalb für die Bearbeitung von Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit wie Metall oder Carbon, aber auch, um Halbleiter und Dielektrika zu bearbeiten, welche überhaupt erst bei den hohen Intensitäten absorbieren. Ein Nachteil der UKP-Bearbeitung ist, dass Verdampfen wesentlich mehr Energie braucht als Verflüssigen. Um 1 mm³ Eisen flüssig zu machen braucht es z.B. nur 7,6 J und damit fast 10x weniger Energie als um dasselbe Volumen zu verdampfen, was 65,7 J benötigt. In heutigen industriellen Anwendungen, wie Laserschneiden oder Laserschweißen, werden typisch einige 10 mm³/s bearbeitet. Das bedeutet, dass UKP-Laser mit Kilowatt mittlerer Leistung notwendig sind, um bei der Präzisionsbearbeitung nur annähernd eine ähnliche Produktivität zu erreichen.

Die Skalierung zu Kilowatt mittlerer Leistung erfolgt bisher bei UKP-Lasern in den meisten Fällen über die Frequenz: Um die Leistung von 100 W auf 1000 W zu erhöhen wird bei konstanter Pulsenergie von ca. 100 μ J die Repetitions-

rate des Lasers von 1 MHz auf 10 MHz erhöht. Auch am Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW) der Universität Stuttgart haben die Laser-Entwickler im Rahmen eines vom BMBF-geförderten Projektes und in Zusammenarbeit mit Trumpf einen Kilowatt-Pikosekunden-Laser aufgebaut. Die Architektur des am IFSW demonstrierten 1,4 kW UKP-Lasers [1] erlaubt erstmals, die mittlere Leistung auch über die Pulsenergie zu skalieren. In diesem Laser wird bei relativ niedrigen Repetitionsraten von 300 kHz die Pulsenergie durch eine geeignete Verstärkung bis auf 4,7 mJ erhöht. Wie üblich, haben beide Vorgehensweisen Vor- und Nachteile. Im Folgenden wird diskutiert, für welche Prozesse und Anwendungen Laser mit hohen Pulsenergien von Interesse sind und erste Resultate zur Materialbearbeitung präsentiert.

Grundsätzliches

Die verschiedenen UKP-Prozesse können aufgeteilt werden zwischen Oberflächenbearbeitung (z.B. Modifizieren und Strukturieren) sowie Bearbeitung in die Tiefe (z.B. Bohren und Trennen). An der Oberfläche ist das Aspektverhältnis, A, (die Strukturtiefe dividiert durch die Strukturbreite) üblicherweise kleiner als eins, da die Strukturen meist nur wenige Mikrometer tief sind. Bohren und Trennen erfolgt demgegenüber oft bei einem

Aspektverhältnis bis ca. 10, größere Werte wären oft sehr gewünscht.

Aus physikalischer Sicht ist es sinnvoll, die möglichen Prozesse über die Fluenz (Pulsenergie pro Fläche) zu beschreiben. Aus Anwendersicht bedeutet das: Der gewünschte Prozess definiert die notwendige Fluenz. Dabei wird im Folgenden unterschieden zwischen der Laser-Fluenz, F_{Laser} (Pulsenergie dividiert durch die Stahl-Querschnittfläche auf dem Werkstück) und der effektiven Fluenz, F_{Eff} (Pulsenergie dividiert durch die effektiv bestrahlte Fläche auf dem Werkstück). Bei der Abtragsschwelle, d.h. bei der Schwell-Fluenz, F_{th} , beginnt der Materialabtrag durch Verdampfen. Knapp unterhalb der Schwelle wird nur ein dünner Flüssigkeitsfilm auf der Oberfläche erzeugt, nahe der Abtragsschwelle entstehen deshalb vor allem Oberflächenmodifikationen. Soll die Oberfläche strukturiert werden, ist die Bearbeitungseffizienz optimal, wenn mit einer Fluenz von ca. 5-mal über der Abtragsschwelle gearbeitet wird, d.h. wenn $F_{Laser} \approx 5 \times F_{th}$ [2]. Die Bedingungen für diese beiden Prozesse bedeuten, dass bei gegebener Pulsenergie der korrekte Strahldurchmesser auf dem Werkstück bestimmt ist, oder umgekehrt, dass bei der gewünschten Strukturgröße die richtige Pulsenergie festgelegt ist.

Bei Bearbeitung auf der Oberfläche ist die effektive Fluenz in etwa gleich wie die Laser-Fluenz. Beim Erzeugen tiefer Strukturen, wie Bohrlöcher oder Nuten, nimmt aber die bestrahlte Fläche mit ca. 2-mal dem Aspektverhältnis zu. Damit wird die effektive Fluenz $F_{eff} \approx F_{Laser} / 2A$. Soll z.B. ein 500 μ m tiefes Loch mit einem Durchmesser von 50 μ m gebohrt werden, so ist am Ende des Bohrvorganges das maximale Aspektverhältnis $A_{max} = 10$. Die effektive Fluenz ist damit ca. 20-mal niedriger als die Laser-Fluenz. Gemäß vorigem Abschnitt sollte zudem auch am Ende der Bohrung noch 5-mal über der Abtragsschwelle gearbeitet werden. Die not-

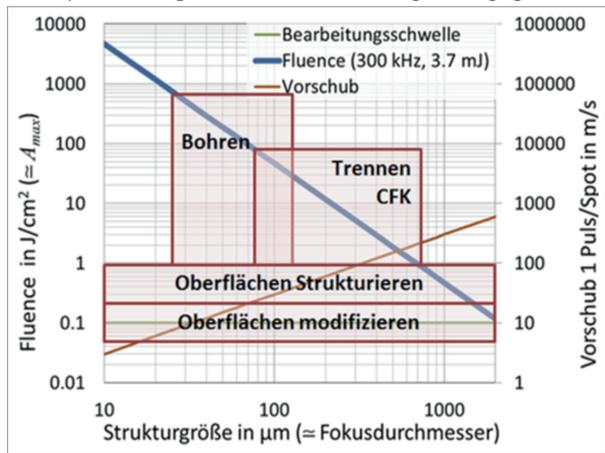


Abb. 1: Parameterraum für die UKP-Laser Materialbearbeitung.

wendige Laser-Fluenz wird damit 100-mal die Schwell-Fluenz auf der Oberfläche! Tiefe, schmale Strukturen benötigen also eine sehr hohe Laser-Fluenz. Oder anders ausgedrückt limitiert die maximale zur Verfügung stehende Pulsenergie bei vorgegebener Strukturgröße die maximal mögliche Bearbeitungstiefe.

Parameterraum für die UKP-Laser Materialbearbeitung

Vor diesem Hintergrund lässt sich nun darstellen, für welche Prozesse und mit welcher Prozessführung die hohen Pulsenergien des IFSW-kW-ps-Lasers möglichst sinnvoll eingesetzt werden können, wie dies in Abbildung 1 dargestellt ist. (Ähnliche Überlegungen gelten natürlich auch für die Skalierung über die Frequenz auf 10 MHz.)

Die x-Achse ist die zu erreichende Strukturgröße, im Folgenden zur Vereinfachung gleich dem Fokusedurchmesser gesetzt. Die dicke blaue Linie zeigt die maximale Laser-Fluenz in J/cm^2 (auf der linken y-Achse), die mit dem IFSW-kW-ps-Laser erreicht werden kann. Die horizontale grüne Linie zeigt als Beispiel die typische Schwell-Fluenz von $0,1 J/cm^2$ für Metalle bei ps-Bearbeitung. Für diese Schwelle und den oben genannten Bedingungen entspricht die Skaleneinteilung der y-Achse gerade dem maximal erreichbaren Aspektverhältnis, A_{max} .

Die roten Flächen entsprechen den Prozessen, so wie sie oben beschrieben wurden. Die Ausdehnung der Flächen ist so gewählt, dass diese mit dem IFSW-Laser noch produziert werden können, d.h. dass die blaue Linie innerhalb der Fläche liegt. Es ist an dieser Stelle wichtig zu bemerken, dass der Laser nur dann effizient genutzt wird, wenn der Prozess auch tatsächlich auf der dicken blauen Linie umgesetzt wird. Dazu gibt es drei Möglichkeiten:

1. Die Fluenz ist vorgegeben: Zum Beispiel bei Oberflächenmodifikation nahe der Schwelle durchquert die blaue Linie die rote Fläche ganz rechts am Rand. Das bedeutet, dass mit einem Puls Strukturgrößen von fast 2 mm erzeugt werden können! **Damit ist dieser Laser ganz besonders für das modifizieren großer Flächen geeignet.**
2. Die Strukturgröße ist vorgegeben: Soll

z.B. ein Loch mit einem Durchmesser von $100 \mu m$ gebohrt werden, so ist ein Aspektverhältnis von ca. 50 möglich, d.h. es kann ein 5 mm tiefes Loch gebohrt werden. **Damit ist dieser Laser besonders geeignet zum Erzeugen tiefer Strukturen.**

3. In vielen Anwendungen ist es nicht möglich, an diese beiden Grenzen vorzustoßen. Was geschieht, wenn z.B. $20 \mu m$ -Strukturen auf der Oberfläche erzielt werden sollten? Der Prozess benötigt ca. $1 J/cm^2$, der Laser kann aber $1000 J/cm^2$ liefern. Die effiziente Lösung ist, parallel zu bearbeiten. In diesem extremen Beispiel kann der Laser in 1000 Teilstrahlen aufgeteilt werden, um damit eine große Fläche an vielen Orten gleichzeitig mit der optimalen Fluenz zu bearbeiten. Erste Konzepte wie das geschehen könnte hat das ILT in Aachen mit der Kombination von diffraktiver Optik und Scanner bereits vorgestellt. **Damit ist dieser Laser besonders geeignet für massiv parallele Bearbeitung.**

Die orange Linie in Abbildung 1 zeigt zudem exemplarisch, wie schnell der Vorschub in m/s sein muss, wenn bei den 300 kHz nur ein einziger Puls pro Ort erlaubt ist um sicher Wärmeakkumulation zu vermeiden. Hier sei angemerkt, dass bei der Bearbeitung mit 10 MHz diese Linie noch 30x weiter oben liegt! In jedem Fall sind aber angesichts der hohen notwendigen Vorschübe auch neue Ansätze für die optische Systemtechnik (z.B. schnelle Scanner, Parallelkonzepte, Axikon-Optiken) unumgänglich.

Umsetzung mit dem IFSW-kw-ps-Laser

Abbildung 2 zeigt die Resultate aus ersten Experimenten mit dem kW-ps-Laser. Wird die Wärmeakkumulation [3] erfolgreich verhindert, kann CFK mit beachtlicher Qualität getrennt werden (Bilder oben) und das bei einem Netto-Vorschub von $0,9 m/min$. Die Oberfläche von Metallen und Glas wurde zudem mit sehr kurzen Bearbeitungszeiten strukturiert (ca. $1 \mu m$ Abtrag in einem $100 \times 100 mm^2$ großen Feld in 4 s).

Anfang 2015 wird der Kilowatt-Pikosekunden-Laser in einer der IFSW-Bearbeitungsanlagen in Betrieb genommen. Als einzigartiges Lasersystem wird es

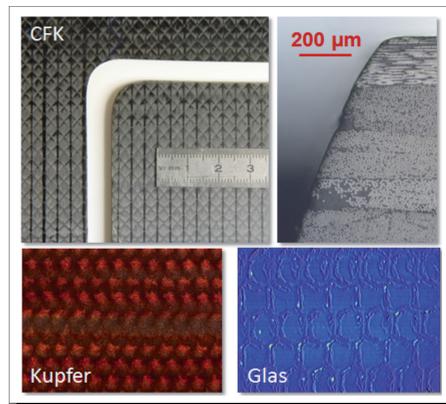


Abb. 2: Erste Resultate aus der kW-ps-Bearbeitung am IFSW. Trennen von CFK (oben) und Oberflächenstrukturieren von Kupfer (unten links) und Glas (unten rechts).

auch für Projekte mit anderen Forschungslabors aber auch mit interessierter Industrie zur Verfügung stehen. Wesentlich mitbeteiligt an den hier präsentierten Resultaten - und damit auch potentielle Ansprechpartner am IFSW - sind von der Mikro-Gruppe Volker Onuseit (Gruppenleiter), Margit Wiedenmann, Anne Feuer und Christian Freitag, sowie von der Laser-Abteilung Jan-Philipp Negel und André Loescher.

Autor



Dr. Rudolf Weber ist Physiker und leitet am Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW) der Universität Stuttgart die Verfahrensentwicklung.

Mail: rudolf.weber@ifsw.uni-stuttgart.de

Literaturverzeichnis

1. J. Negel et al., "1.1 kW average output power from a thin-disk multipass amplifier for ultrashort laser pulses," *Optics Letters* 38, (24), 5442-5445 (2013)
2. B. Jaeggi et al., „Influence of the Pulse Duration in the ps-Regime on the Ablation Efficiency of Metals“, *Physics Procedia* 12 164–171, (2011)
3. R. Weber et al., „Heat accumulation during pulsed laser materials processing“, *OE 22* (9), pp. 11312 (2014)