

Systemtechnik für Ultrakurzpuls-Anwendungen

Forschungsbedarf für die Produktivitätssteigerung der UKP-Laserbearbeitung

Um die rasanten Fortschritte seitens der Strahlquellen und beim Verständnis der Verfahrensgrundlagen in eine Produktivitätssteigerung bei den Verfahren der Ultrakurzpuls Laserbearbeitung umzuwandeln, sind neue systemtechnische Impulse erforderlich. Dies ist ein Forschungsschwerpunkt des neuen Geschäftsbereichs Systemtechnik am IFSW.

Eines der dynamischsten Forschungsfelder der letzten Jahre im Bereich der Lasermaterialbearbeitung sind die Ultrakurzpulsanwendungen, vor allem in dem für viele Materialien interessanten Pulsdauerbereich von unter zwanzig Pikosekunden bis hin zu wenigen hundert Femtosekunden. Mit diesen Pulsdauern lassen sich die unterschiedlichsten Applikationen verwirklichen, das Spektrum der Verfahren reicht dabei vom Bohren von hochpräzisen Mikrolöchern über das Abtragen und Trennen bis hin zum Strukturieren von Oberflächen bei unterschiedlichsten Materialien. Viele dieser Anwendungen haben es schon in die industrielle Serienproduktion geschafft, allerdings ist oft die Produktivität der Verfahren zu gering um die notwendigen Investitionen für Laser, Anlage und Optiksyste me zu rechtfertigen. Die für die Kostenbetrachtungen wichtige Produktivität (Abtragr ate bei gleichbleibend hoher Qualität) des Gesamtsystems wird dabei vor allem durch die verfügbare mittlere Leistung des Lasersystems und durch die verwendbare mittlere Leistung des Prozesses limitiert.

Durch die Steigerung der verfügbaren mittleren Leistung von UKP-Systemen, wie der in Abbildung 1 dargestellten Leistungsentwicklung von Laborsystemen im Pulsdauerbereich von 500 fs – 20 ps zu entnehmen ist, stehen aber jetzt

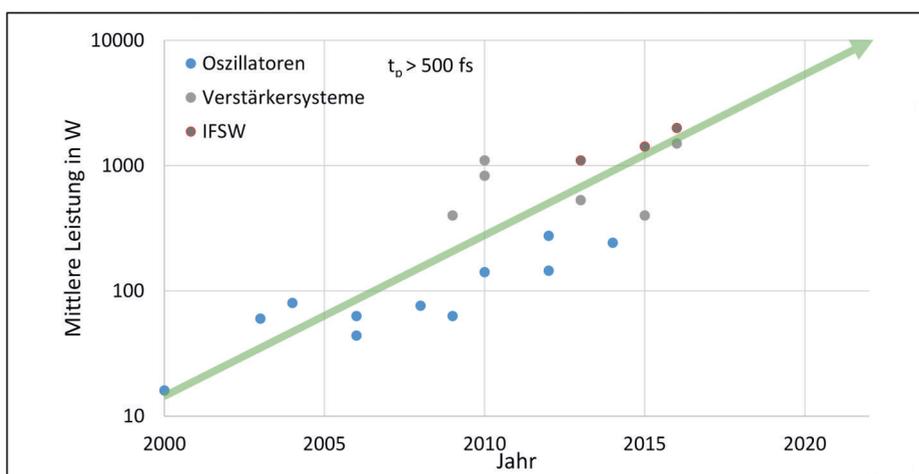


Abbildung 1: Leistungsentwicklung von UKP-Lasersystemen im Pulsdauerbereich von 0,5 – 20 ps (Laborsysteme).

in den Laboren mittlere Leistungen von mehr als 1 kW zur Verfügung [1,2]. Der aktuelle Rekord am IFSW für Verstärkersysteme in diesem Pulsdauerbereich liegt hierbei bei 2 kW [3]. Die Leistungssteigerung wird zurzeit über zwei verschiedene Wege erreicht: Über eine Steigerung der Pulsenergie bei konstanter Repetitionsrate oder über eine Steigerung der Repetitionsrate bei konstanter Pulsenergie. Bei einer weiteren, abzusehenden Steigerung der mittleren Leistung ist aber davon auszugehen, dass beide Wege kombiniert werden müssen. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass die Eigenschaften der Strahlquelle eine

direkte Auswirkung auf die mögliche Prozessgestaltung haben.

Für die Steigerung der Produktivität der Materialbearbeitungsprozesse ist die verfügbare mittlere Leistung nur eine notwendige Bedingung, da der Prozess die sinnvoll verwendbare mittlere Leistung an einem Ort beschränkt. Dies geschieht zum einen durch direkt von der mittleren Leistung abhängige Prozessgrenzen wie die Wärmeakkumulation [4,5] zwischen einzelnen Pulsen oder zwischen mehreren, repetitiven Überfahrten [6] und zum anderen durch indirekt beeinflusste Grenzen wie die Begrenzung der sinnvoll verwendbaren Fluenz (J/cm^2) aus Gründen einer effizienten Energieeinkopplung [7,8]. Ausgehend von diesen beiden Grenzen lässt sich der F&E-Bedarf im Bereich Systemtechnik der UKP-Systeme beschreiben. Für eine grobe Auslegung der Systeme und Anlagen für einzelne UKP-Verfahren sind vereinfacht dargestellt vier Schritte notwendig:

1. Die kleinste zu erzeugende Strukturgröße legt, zusammen mit der Abtragschwelle des zu bearbeitenden Materials, den minimal zu verwendenden Fokus-

Verfahren	Verwendete Fokusbereich	Tiefe	Aspektverhältnis	Fluenz im Fokus
Oberflächenbearbeitung	100 – 2000 μm	0.1 – 10 μm	0.1 – 0.005	0,05 – 0,75 J/mm^2
Abtragen	10 – 100 μm	10 – 100 μm	0.1 – 2,5	0,75 – 3,75 J/cm^2
Trennen	20 – 200 μm	50 – 2000 μm	2,5 – 10	3,75 – 15 J/cm^2
Mikrobohren	20 – 100 μm	100 – 2000 μm	5 – 20	7,5 – 30 J/cm^2
Tiefbohren	50 – 200 μm	1 – 10 mm	20 – 100	30 – 75 J/cm^2

Tabelle 1: Ordnungsschema der Verfahren.

durchmesser fest unter der Bedingung, dass aufgrund der Abtragschwelle nicht stärker fokussiert werden muss.

2. Die Abtragschwelle, Energieeindringtiefe und andere material-, wellenlängen- und pulsdauerabhängige Größen legen für eine effiziente Bearbeitung die zu verwendende Fluenz fest. Daraus ergibt sich mit dem Fokusbereich unter Punkt 1 die zu verwendende Pulsenergie.

3. Die wichtigste Vorgabegröße neben der Geometrie ist die gewünschte Prozesszeit. Diese bestimmt die Produktivität bzw. Abtragsrate die erreicht werden muss und legt somit die benötigte mittlere Leistung fest.

4. Über Punkt 2 und 3 wird im einfachsten Fall einer Einstrahl-Bearbeitung direkt die Repetitionsrate der Laserquelle festgelegt. Daraus folgt aus der Wärmeakkumulation die benötigte Verfahrensgeschwindigkeit zur Vermeidung der Pulsakkumulation und, für meistens benötigte mehrere Überfahrten um das Gesamtvolumen zu bearbeiten, die Anzahl der Sprünge und im schlimmsten Fall der Wartezeiten zur Vermeidung der Scanakkumulation.

Somit lassen sich die klassischen Verfahren der Mikromaterialbearbeitung über die zu erzeugenden minimalen Strukturgrößen und die nötigen Fluenzen ordnen. Die Strukturgrößen werden in dieser Abschätzung mit dem Fokusbereich gleichgesetzt. Die Abschätzung der notwendigen Fluenz im Fokus erfolgt über das zu erzeugenden Aspektverhältnis $A = t/s$ (Tiefe der Struktur t im Verhältnis zur Strukturgröße s) und

der in [8] beschriebenen Abhängigkeit einer effizienten Fluenz von der Abtragschwelle des betrachteten Materials $\Phi_{eff} = e^2 * \Phi_{th}$ (für ein prozesssicheres Arbeiten bietet es sich aber an bei höheren Fluenzen zu arbeiten $\Phi = 10 * \Phi_{th}$). Die tatsächlich benötigte mittlere Fluenz im Fokus, lässt sich dann im einfachsten Fall über die Mantelfläche eines Kegels abschätzen, mit der Strukturgröße als Grundfläche und der Tiefe als Funktion des Aspektverhältnis in diesem Fall beispielhaft für den Werkstoff Stahl mit einer angenommenen Abtragschwelle von $0,1 \text{ J/cm}^2$ (die Werte siehe Tabelle 1).

Diese Verfahren lassen sich nun in einem Diagramm Fluenz über Fokusbereich auftragen (siehe Abbildung 2). Zudem lassen sich Kennlinien für unterschiedliche Lasersysteme für Pulsenergie und Repetitionsrate einzeichnen. In diesem Fall in Grün ein Verstärkersystem mit 1 kW mittlerer Leistung bei einer Repetitionsrate von 300 kHz was einem am IFSW verfügbaren System entspricht und in Blau ein System gleicher mittlerer Leistung bei hoher Repetitionsrate von 10 MHz . Eine effiziente Bearbeitung, bei der die maximale mittlere Leistung eingesetzt wird, ist bei vielen heutigen Systemen nur entlang der Energiekennlinie möglich (durchgezogene Linien). In den Bereichen unterhalb ist es notwendig entweder die Pulsenergie zu verringern oder zu einer parallelen Bearbeitung überzugehen, um die Leistung der Strahlquelle effizient zu nutzen. Die Bereiche oberhalb sind nur über höhere Pulsenergien erreichbar. Zudem ergibt

sich aus der Repetitionsrate und dem verwendeten Fokusbereich eine Kennlinie für die benötigte Verfahrensgeschwindigkeit des Strahls (gestrichelte Linien). Um die Wärmeakkumulation zu vermeiden wird in diesem Fall nur maximal ein Puls pro Fokusbereich zugelassen. Für große Fokusbereiche werden dadurch bei niedriger Repetitionsrate somit schon Vorschubgeschwindigkeiten im Bereich von 100 m/s benötigt. Für Lasersysteme mit höherer Repetitionsrate müssten schon Geschwindigkeiten von mehreren km/s eingeplant werden. Um die Produktivität dieser Systeme vollständig auszunutzen sind, neben den hohen Verfahrensgeschwindigkeiten zur Vermeidung der Wärmeakkumulation, künftig aber auch Systeme für eine hochdynamische Strahlformung nötig um in verschiedenen Prozessphasen die Fluenz auf den Prozess anzupassen. Zudem bietet sich gerade für die Erzeugung gleicher Geometrien eine Parallelisierung der Prozesse an, um die Leistung der Laserstrahlquellen effizient zu nutzen und die Produktivität zu erhöhen. Zudem wird es eine Aufgabe sein, die Laserstrahlquellen deutlich flexibler zu gestalten, um die Vielseitigkeit des Werkzeuges Laser besser auszunutzen.

Referenzen:

[1] J. Negel et al., Opt. Lett. (2013).
 [2] T. Sartorius et al. SPIE LASE (2016).
 [3] J.P. Negel et al. Proceedings of ASSL (2016).
 [4] R. Weber, et al. Optics Express (2014).
 [5] F. Bauer, et al. Optics Express (2015).
 [6] C. Freitag, et al., Applied Physics A, (2015).
 [7] G. Račiukaitis, et al., J. Laser Micro Nanoen. (2009).
 [8] B. Neuenschwander, et al., SPIE LASE (2012).
 [9] R. Weber, Laser Magazin (2014).

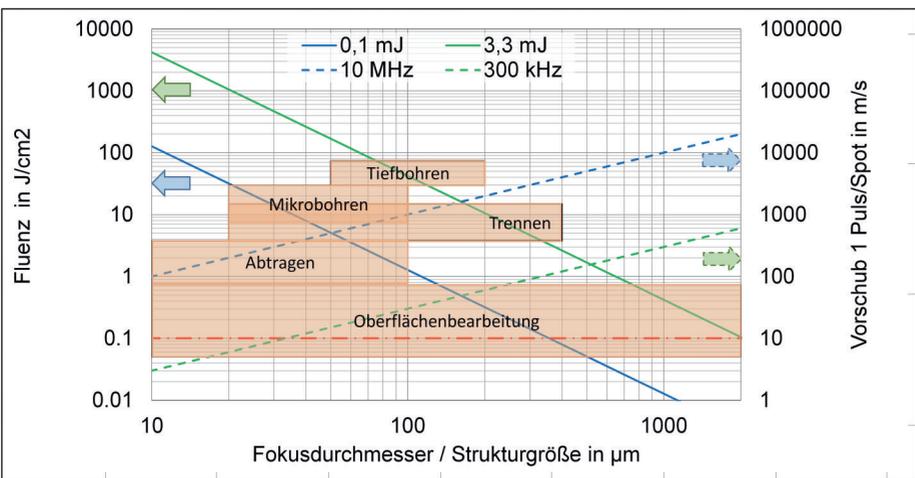


Abbildung 2: Prozessfenster für die UKP-Bearbeitung von verschiedenen Verfahren und Kennlinie möglicher Lasersysteme nach [9].

Autor:

Dipl.-Ing. Volker Onuseit
 Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)
 Leiter Systemtechnik
 Universität Stuttgart
 Pfaffenwaldring 43
 70569 Stuttgart
 Tel.: +49 (0)711 685 69751
 E-Mail: volker.onuseit@ifsw.uni-stuttgart.de