

Durchbruch mit UKP-Lasern am IFSW

Entwicklung und erstmalige Anwendung eines Pikosekundenlasers mit 1,4 kW Ausgangsleistung und Pulsenergien im Millijoule-Bereich

Am Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW) der Universität Stuttgart wurde, in Kooperation mit der Trumpf Laser GmbH, ein Scheibenlaserverstärker entwickelt, mit welchem 8 ps Pulse erzeugt werden mit einer Pulsenergie von 4,7 mJ und einer Durchschnittsleistung von 1,4 kW bei einer Wellenlänge von 1030 nm. Durch Frequenzkonversion in einem LBO-Kristall gelang es mehr als 800 W Durchschnittsleistung im grünen Spektralbereich zu erzeugen. Weiterhin wurde in einem bisher einmaligen Experiment, in Kooperation mit der Abteilung für Verfahrensentwicklung des IFSW, die infrarote Strahlung eingesetzt, um CFK hochpräzise mit nie dagewesener Produktivität zu schneiden.

In den vergangenen Jahren wurden verstärkt Ultrakurzpulslaser (Femtosekunden bis Pikosekunden Pulsdauer) in der Lasermaterialbearbeitung eingesetzt. Darunter fallen Anwendungen wie z.B. Mikrostrukturierungen von Oberflächen oder das Bohren kleinster Löcher. Zunehmendes Interesse besteht in der Verwendung von UKP-Lasern zum effizienten Schneiden und Strukturieren von Kohlenstofffaserverstärkten-Kunststoffen (CFK), um zum einen dem Werkzeugverschleiß konventioneller Techniken entgegen zu wirken und zum anderen hohe Präzisionen und Prozessgeschwindigkeiten zu ermöglichen. Der grundlegende Vorteil der Verwendung von ultrakurzen Laserpulsen besteht darin, dass eine kalte Ablation stattfinden kann. Die Wärme wird nicht über eine lange Zeitdauer in das Bauteil eingebracht und so eine relativ große Schädigungszone erzeugt, sondern der Puls verdampft das Material in sehr kurzer Zeit ohne bedeutenden Wärmetransport. Dies erlaubt sehr große Präzisionen und wird insbesondere bei CFK benötigt, da die Kunststoffmatrix einen sehr viel tieferen Schmelzpunkt und Wärmeleitkoeffizienten besitzt als die Kohlenstofffasern. Dadurch wird beim Trennen von CFK mit cw-Lasern eine sehr hohe



Abb. 1: Foto der Spiegelmatrix zur Faltung des Strahlengangs im Multipassverstärker. Es werden 40 Spiegel eingesetzt, welche einzeln justierbar auf einer gekühlten Kupferplatte angebracht sind.

Schädigung erzeugt, was durch die Anwendung von UKP-Systemen vermieden werden kann. Für diesen Prozess ist es nötig, dass die Pulsenergie hoch genug ist um über die Abtragsschwelle zu gelangen. Gleichzeitig ermöglicht eine hohe mittlere Ausgangsleistung höhere Prozessgeschwindigkeiten und damit eine höhere Produktivität.

In den letzten Jahren wurden verschiedene Konzepte zur Leistungsskalierung von UKP-Lasern entwickelt. Die direkte Extraktion aus modengekoppelten Oszillatoren wird derzeit auf Ausgangsleistungen kleiner 300 W begrenzt durch die hohen Intensitäten und damit verbundenen Nichtlinearitäten innerhalb der Kavität. Deshalb werden zur weiteren Leistungsskalierung verschiedene Verstärkerkonzepte eingesetzt. Die Konzepte basieren auf verschiedenen Geometrien des laseraktiven Mediums, wie photonische Kristallfasern, Slabs, sowie Scheiben. Mittels einer Slabverstärkerkette konnten am ILT in Aachen bereits maximale Ausgangsleistungen von 1,1 kW bei 55 μ J Pulsenergie und 615 fs Pulsdauer demonstriert werden. Systeme auf

Scheibenlaserbasis gliedern sich in regenerative Verstärker unter Einsatz von optischen Schaltern und Systeme in denen der zu verstärkende Strahl rein geometrisch mehrfach über die gepumpte Scheibe gefaltet wird - so genannte Multipassverstärker - um die erforderliche Verstärkung zu erreichen. Regenerative Verstärker können sehr hohe Verstärkungsfaktoren erzeugen, sind aber ohne Chirped Pulse Amplification (CPA) bei ultrakurzen Pulsen in ihrer Ausgangsleistung begrenzt. Multipassverstärker hingegen besitzen diese Limitierungen nicht und sind prinzipiell für Multi-kW Anwendungen geeignet, zeigen allerdings geringere Verstärkungsfaktoren. Darum ist es notwendig, dass der zu verstärkende Strahl (Seed) bereits genügend Ausgangsleistung besitzt.

Am IFSW wurde nun, in Zusammenarbeit mit der Trumpf Laser GmbH, der Ausgangsstrahl eines modifizierten kommerziellen TruMicro 5050 mittels einer Multipassgeometrie verstärkt. Der Seedlaser hat eine Ausgangsleistung von 115 W bei einer Pulsrepetitionsrate von 300 kHz. Die Pulsdauer beträgt 6.5 ps

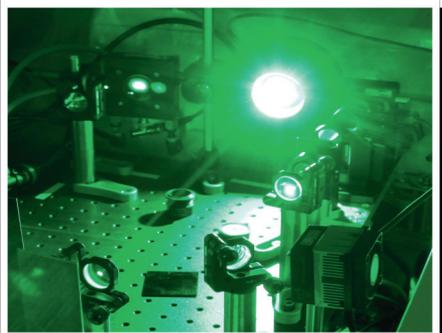


Abb. 2: Foto des Aufbaus zur Frequenzverdopplung.

und die Pulsenergie 383 μ J. Dieser Strahl wird nun geometrisch über den gepumpten Bereich eines Yb:YAG-Scheibenlaserkristalls gefaltet. Der Kristall ist auf einer Diamantwärmesenke aufgeklebt und befindet sich innerhalb eines am IFSW kommerziell erhältlichen "G1-Moduls". Dieses ermöglicht 24 Durchgänge des Pumplichts durch die Scheibe. Die Pumpdioden sind eine Entwicklung der Trumpf Laser GmbH und emittieren 2,7 kW Laserleistung bei einer Wellenlänge von 969 nm. Diese Pumpwellenlänge ermöglicht eine Reduzierung der thermischen Effekte auf der Scheibe durch Verringerung des Quantendefekts um 48 % im Vergleich zu der konventionellen Pumpwellenlänge von 940 nm. Die geometrische Faltung des Seedlaserübergangs über die Scheibe erfolgt nun mittels 40 Spiegeln, welche auf einem wassergekühlten Kupferhalter aufgebracht und einzeln justierbar sind und der Scheibe gegenüberstehen (siehe Abb. 1). Dies ermöglicht zunächst 20 Reflektionen des Seedstrahls auf der Scheibe. Da der Seedstrahl linear polarisiert ist, wird mit Hilfe eines Endspiegels und geeigneter Polarisationsoptik der Strahl noch einmal rückwärts durch den Verstärker geschickt und so die Anzahl der Durchgänge durch die Scheibe verdoppelt auf insgesamt 40. Dies hat den Vorteil, die Extraktion der Energie von der Scheibe zu erhöhen und somit eine höhere gesamte Ausgangsleistung zu erzielen.

In den Untersuchungen wurde eine maximale Ausgangsleistung von 1420 W bei der maximalen Pumpleistung von 2,7 kW demonstriert. Bei der vom Seedlaser vorgegebenen Repetitionsrate von 300 kHz entspricht dies einer Pulsenergie von 4,7 mJ. Die Messung wird begleitet durch einen langfristigen Drift des Ausgangsstrahls über ca. 6-8 Minuten, was vermutlich durch eine langsame Erwärmung der verwendeten Komponenten einhergeht und Gegenstand weiterer Verbesserungen sein wird. Die Pulsdauer nach dem Verstärker ist bei Zugrundelegung eines gaußschen zeitlichen Pulsprofils kleiner als 8 ps. Die gemessene Beugungsmaßzahl, M^2 , ist kleiner als 1,4. Dies ist die bislang höchste gemessene Ausgangsleistung eines UKP-Lasers.

In einem weiteren Experiment wurde der Ausgangsstrahl des Multipassverstärkers verwendet um Frequenzverdopplung in einem LBO-Kristall zu erzielen (siehe Abb. 2). Hier konnte bei einer Eingangsleistung von 1170 W bei 1030 nm eine Ausgangsleistung nach dem Kristall von 820 W bei 515 nm erreicht werden. Dies entspricht einer Konversionseffizienz von ca. 70 % und ist ebenfalls die bisher höchste berichtete Ausgangsleistung von UKP-Lasern im grünen Spektralbereich.

Weiterhin wurde von einem Team des IFSW (Laser- und Verfahrensentwicklung) der infrarote Ausgangsstrahl (ohne den Frequenzverdopplungskristall) verwendet, um erstmalig mit UKP-Lasern im kW-Bereich CFK zu bearbeiten. Hier ist insbesondere die, im Vergleich zu auf anderen Konzepten basierenden Systemen, hohe Pulsenergie von Vorteil. Der linear polarisierte Strahl wurde mittels eines in einem motorisierten Drehhalter befindlichen $\lambda/2$ -Plättchens und eines Dünnschichtpolarisators zwischen Strahlsumpf und Bearbeitungsanlage umgeschaltet. Der Scanner in der Anlage erreichte eine maximale Geschwindigkeit von 30 m/s und der Fokussdurchmesser betrug 100 μ m. Das zu bearbeitende CFK-Werkstück hatte eine Dicke von 2 mm. Es wurden Rechtecke in der Größe 20 cm x 10 cm nach insgesamt 2100 Überfahrten des Laserstrahls ausgeschnitten. Dabei wurde nach jeweils 100 Überfahrten eine Abkühlpause vorgenommen, um der Wärmeakkumulation im Bauteil durch den Puls der vorherigen Überfahrt entgegen zu wirken, wobei die Abkühlpausen für den Zuschnitt anderer Bauteile Verwendung finden können. Es zeigte sich, dass die Wärmeschädigung an den Schnittkanten im Bereich weniger Mikrometer liegt (siehe Abb. 3). Insgesamt konnte in diesen Versuchen eine nie dagewesene Produktivität für die Bearbeitung von CFK demonstriert werden.

In weiteren Experimenten wurde das Schneiden von Metallblechen und das Oberflächenstrukturieren verschiedener Materialien, wie Glas, Plexiglas, Keramiken, Stahl, Kupfer und Aluminium untersucht. Die Ergebnisse werden derzeit ausgewertet und demnächst veröffentlicht.

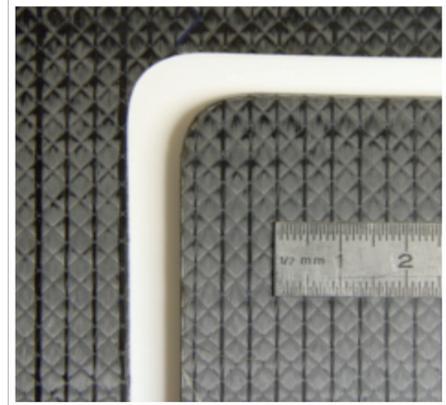


Abb. 3: Foto des ausgeschnittenen Rechtecks aus einer 2 mm dicken CFK-Probe. Die Schnittkanten weisen nur eine geringe Schädigung auf.

Zusammenfassend wurde ein UKP-Multipassverstärkersystem entwickelt mit einer Ausgangsleistung von 1,4 kW, einer Pulsdauer kleiner als 8 ps und einer Pulsenergie von 4,7 mJ. Diese Rekordausgangsleistung wurde verwendet um durch Frequenzverdopplung 820 W Ausgangsleistung bei 515 nm zu erzeugen. In ersten Untersuchungen wurden mit dem System bei 1030 nm Materialbearbeitungsexperimente, hauptsächlich mit CFK, durchgeführt, was zu nie dagewesener Produktivität bei guter Schnittqualität führte.

Neben weiteren Materialbearbeitungsexperimenten wird der Fokus weiterer Arbeiten auf der Weiterentwicklung des Verstärkers liegen, insbesondere der weiteren Skalierung der Ausgangsleistung, der Verbesserung der Langzeitstabilität durch verbesserte Kühlung, sowie weitere Experimente zur Frequenzvervielfachung.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Autor / Kontakt:

Dipl.-Phys. Jan-Philipp Negel
Institut für Strahlwerkzeuge, Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 43
70569 Stuttgart
Tel.: +49 (0)711 685 69721
Fax: +49 (0)711 685 66842
E-Mail: jan-philipp.negel@ifsw.uni-stuttgart.de