

# Optisches System mit individueller Strahlmanipulation von bis zu 64 Teilstrahlen für die UKP Multistrahl-Lasermaterialbearbeitung

Mario Hesker\*, Jochen Stollenwerk\* \*\*, Peter Loosen\* \*\*

\*Lehrstuhl für Technologie Optischer Systeme, RWTH Aachen University

\*\*Fraunhofer-Institut für Lasertechnik, Aachen

<mailto:mario.hesker@tos.rwth-aachen.de>

Für neue Hochleistungs-Ultrakurzpuls-Laserstrahlquellen mit mittleren Leistungen von über 1000 W wird ein optisches Konzept ausgelegt, das eine Aufteilung des Laserstrahls in bis zu 64 einzeln adressierbare Teilstrahlen erlaubt. Die so erzeugte Strahlmatrix wird mit einem Scanner-System in der Bearbeitungsebene geführt, um so eine effiziente Bearbeitung zu ermöglichen.

## 1 Motivation

Ultrakurzpulslaserbearbeitung ist derzeit für viele industrielle Anwendungen unwirtschaftlich. Entweder ist die verfügbare Laserleistung zu klein, um den notwendigen Durchsatz zu erreichen, oder es kommt bei zu hoher Pulsenergie zu Plasmabildung oder thermischer Akkumulation.

Der hier vorgestellte Ansatz basiert auf der Idee eines leistungsstarken „Punkt-Matrix-Druckers“. Die große Laserleistung soll dazu in Teilstrahlen aufgeteilt werden, die individuell an- bzw. ausgeschaltet werden können.

## 2 Stand der Technik

Der Einsatz ultrakurzer gepulster Laserstrahlung (UKP) mit Pulsdauern im Bereich einiger hundert Femtosekunden ermöglicht die Materialbearbeitung mit hoher Auflösung und Präzision im Mikrometerbereich. Durch Pulsdauern, die im Bereich der Elektronen-Phononen-Relaxationszeiten liegen, kann die Wärmediffusion vernachlässigt werden und eine quasi schmelzfreie Verarbeitung mit vernachlässigbarer thermischer Belastung ist möglich [1]. Im Labor wurden bereits UKP-Leistungen im >1 kW-Bereich mit Hilfe von Yb-YAG-Slab Laser [2] und eines Faserlasers [3] bei ~600 fs Pulsdauer demonstriert. Am Markt befindliche Systeme erreichen ca. 100 W bei < 500 fs [4]. Neu ist die Entwicklung einer freien Puls-Triggerung, um den Anforderungen dynamischer Bearbeitungsprozesse gerecht zu werden.

Die mittlere Leistung einer gepulsten Laserquelle ist das Produkt aus Pulsenergie und Wiederholrate. Daher gibt es zwei prinzipielle Ansätze zur Skalierung von UKP-Prozessen:

1. Skalierung durch Erhöhung der Pulsenergie.
2. Skalierung durch Erhöhung der Pulswiederholrate.

Wie Raciukaitis et al. [5] und Neuenschwander et al. [4,6] zeigen, ist die entsprechende Fluenz (Pulsenergie pro Spotfläche) aus Effizienz- und Qualitätsgründen auf einige J/cm<sup>2</sup> begrenzt. Aufgrund dieser Einschränkung kann ein Upscaling durch Erhöhung der Pulsenergie realisiert werden, indem die Pulsenergie des von der Strahlquelle emittierten Laserstrahls in mehrere Teilstrahlen aufgeteilt wird. Die Strahlteilung erfolgt in der Regel durch den Einsatz von diffraktiven optischen Elementen oder von räumlichen Lichtmodulatoren [7].

Große Pulswiederholraten erfordern große Ablengeschwindigkeiten. Dafür eignen sich schnellrotierende Polygonscanner. Nachteilig sind hier eine geringe Laser-On-Zeit, bei Strukturen mit kleinen Füllfaktoren und die Einschränkung auf eine Bearbeitungsdimension. Unregelmäßigkeiten der Oberfläche des Polygon-Scanners werden durch sog. „pulse picking“ kompensiert. Bei dieser schnellen Modulation werden Laserpulse gezielt aus einer Pulsfolge ausgewählt. Hierdurch werden gleichzeitig die Pulse unterdrückt, die nicht die gewünschte Ablenkung durch den Scanner erreichen. Durch die Limitation des pulse pickings im geringen MHz-Bereich, ist ein Upscaling hier begrenzt.

## 3 Multistrahlkonzept

Der Rohstrahl wird mittels eines diffraktiven optischen Elements (DOE) in eine Matrix von 8x8 Strahlen aufgeteilt. Hierbei wird die Eigenschaft genutzt, dass die Intensitätsverteilung der Einzelstrahlen annähernd der des Rohstrahls entspricht.

Dabei muss ein Kompromiss zwischen der Uniformität und Effizienz bestimmt werden. Die Uniformität gibt an, wie stark die mittlere Leistung zwischen den Hauptbeugungsordnungen variiert. Die Effizienz ist definiert als das Verhältnis der Leistung aller gewünschten Beugungsordnungen zu der eingestrahnten Gesamtleistung. Erreicht werden hierbei 70-80%. Die 0. Beugungsordnung kann in dem vorgestellten Konzept nicht genutzt werden und wird

mit einer Strahlfalle geblockt. DOEs lassen sich derart herstellen, dass die Ablenkungswinkel in beiden Achsen im Bereich bis zu 10°-Schritten liegen. Zusätzlich ist es möglich, beide Achsen in unterschiedlichen Winkelschritten zu fertigen.

Zur individuellen An- und Ausschaltung der Teilstrahlen werden akustooptische Modulatoren (AOMs) verwendet. Die Einzelstrahlen müssen dazu kollimiert unter einem definierten Winkel (Bragg-Winkel) auf das AOM treffen. Durch Schalten des AOMs wird ein Beugungsgitter im inneren des verbauten Kristalls erzeugt, sodass der Laserstrahl abgelenkt und bis zum Werkstück propagiert wird. Die nicht abgelenkten Strahlen werden durch eine Strahlfalle in Form einer Maske absorbiert. Es werden bei der 8x8 Matrix acht AOMs verbaut, die jeweils acht einzeln schaltbare Strahlen bedienen.

Zur Strahlführung bieten sich verschiedene Lösungsmethoden an. Zum einen ist eine Relay-Optik zu nennen (Abb. 1), bei dem der Strahlenfächer nach dem DOE durch Linsen kollimiert wird und die einzelnen Teilstrahlen in die AOMs fokussiert werden. Diese werden im Anschluss durch eine zweite Relay-Optik auf das Werkstück abgebildet. Nachteilig sind hier die Notwendigkeit großer Optiken (> 200 mm) und dass die Einzelstrahlen fokussiert durch die AOMs propagieren, was deren Effizienz reduziert. Um die Bildfehler durch die Scanner-Bewegung zu minimieren, wird das DOE zwischen die beiden Spiegel abgebildet.

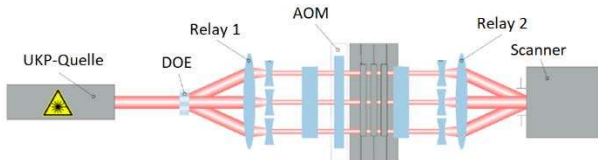


Abb. 1 Lösungsvorschlag Relay-Optik

Alternativ werden die Einzelstrahlen mittels Spiegelprismen abgelenkt (Abb. 2). Das bietet die Vorteile einer größeren Anzahl an Freiheitsgraden, eines kollimierten Durchgangs der Einzelstrahlen durch die AOMs, sowie einer kostengünstigeren Fertigung, da Standardbauteile verwendet werden können.

Aufgrund der Strahldivergenz, auch bei kollimierten Strahlen, ist eine Egalisierung der Propagationsstrecken vom DOE zu den AOMs notwendig. Gelöst werden kann das Problem entweder durch eine pfeilförmige Anordnung der acht AOM-Module (Abb. 2), oder durch Anordnung der AOMs – im Falle der Prismenlösung – als Fächer mit konstantem Abstand zum DOE. Hierbei stehen die AOMs in der jeweiligen Propagationsrichtung der Einzelstrahlen, wodurch weitere optische Elemente und Freiheitsgrade vermieden werden können.

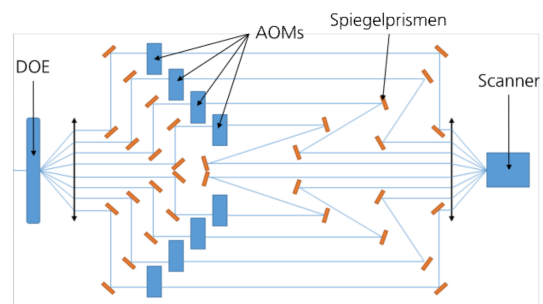


Abb. 2 Lösungsvorschlag Prismen-Optik

## 4 Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung des Projektes „MultiFlex“ im Rahmen des European Union's Horizon 2020 research and innovation program unter der grant agreement No. 825201.

## 5 Literatur

- [1] B. N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. von Alvensleben, A. Tünnermann, "Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids," *Applied Physics A*, No. 63, 1 Jan. 1996, pp. 109–115.
- [2] P. Russbueldt, D. Hoffmann, M. Hofer, J. Lohring, J. Luttmann, A. Meissner, J. Weitenberg, M. Traub, T. Sartorius, D. Esser, R. Wester, P. Loosen and R. Poprawe, "Innoslab Amplifiers," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 21, no. 1, 1 Jan. 2015, pp. 447–463.
- [3] T. Eidam, S. Hanf, E. Seise, T. V. Andersen, T. Gabler, C. Wirth, T. Schreiber, J. Limpert and A. Tünnermann, "Femtosecond fiber CPA system emitting 830 W average output power," *Optics Letters*, vol. 35, no. 2, 1 Jan. 2010, p. 94.
- [4] B. Neuenschwander, B. Jaeggi, M. Schmid, V. Rouffiange, P.-E. Martin, G. Hennig, X. Xu, B. Gu and Y. Nakata, "Optimization of the volume ablation rate for metals at different laser pulse-durations from ps to fs," *Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XVII*, 1 Jan. 2012.
- [5] G. Raciukaitis, M. Brikas and M. Gedvilas, "Efficiency aspects in processing of metals with high-repetition-rate ultra-short-pulse lasers," *Proceedings of ICALEO 2008*, 1 Jan. 2008.
- [6] B. Jaeggi, B. Neuenschwander, M. Schmid, M. Murali, J. Zuercher and U. Hunziker, "Influence of the Pulse Duration in the ps-Regime on the Ablation Efficiency of Metals," *Physics Procedia*, No. 12, 1 Jan. 2011, pp. 164–171.
- [7] L. Büsing, S. Eifel and P. Loosen, "Design, alignment and applications of optical systems for parallel processing with ultra-short laser pulses," *SPIE Photonics Europe 2014, Belgium, Proceedings Volume 9131, Optical Modelling and Design III*, 1 Jan. 2014.