

Strahldiagnostik im Diagnostikzentrum der FGSW Fokussierung von Single-Mode Laserstrahlung im kW-Bereich

In der Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge mbH (FGSW) in Stuttgart wurde im Jahr 2005 das „Zentrum für Diagnostik laserbasierter Fertigungsverfahren“ eingerichtet. Zur Ausstattung dieses Zentrums zählen modernste Diagnose- und Messeinrichtungen zur Prozess- und Strahldiagnostik für Mikro- und Makromaterialbearbeitung, die in dieser Zusammenstellung weltweit einmalig sind. Die finanziellen Mittel dafür wurden im Rahmen der „Zukunftsoffensive III“ von der Landesstiftung Baden-Württemberg bereitgestellt. Die vielseitige Diagnostikausstattung des Zentrums ermöglicht der FGSW, Projekte zur Aufklärung qualitätsmindernder Prozessstörungen durchzuführen, sowie die Industrie bei der Lösung akuter Fertigungsprobleme zu unterstützen.

Die neueste Generation stark fokussierbarer Festkörperlaser erfreut sich zunehmender Verbreitung bei verschiedensten Anwendungen, insbesondere im Dünoblechbereich. Zurzeit erreichen die neuesten diodengepumpten Scheiben- und Faserlaser Strahlqualitäten von $M^2 < 10$ bis hinunter zur Beugungsgrenze ($M^2=1$), bei Laserleistungen im Kilowattbereich. Um die benötigte Leistungsdichteverteilung für den gewünschten Bearbeitungsprozess zu erreichen, muss der Laserstrahl durch ein geeignetes Linsensystem geformt werden. Aufgrund von Unvollkommenheiten der verwendeten Linsen kommt es fast immer vor, dass das resultierende Strahlparameterprodukt beziehungsweise die Beugungsmaßzahl M^2 nach der Fokussierung schlechter ist als erwartet, siehe Abbildung 1. Dies führt dazu, dass bei gegebenen Fokussierbedingungen der entstehende Fokussdurchmesser größer ausfällt als berechnet. Des Weiteren wird durch die Absorption von Laserstrahlung im Linsenmaterial und der Antireflexionsschicht, eine Verkürzung der effektiven Brennweite des Systems

hervorgerufen – der sogenannte laserinduzierte Fokus-Shift. Zur Darstellung der genannten Effekte wurden insgesamt fünf verschiedene Bearbeitungsköpfe vermessen. Zwei Bearbeitungsköpfe mit einem Linsendurchmesser von $D = 25$ mm (Kollimationsbrennweite $f(\text{col}) = 60$ mm, Fokussierbrennweiten $f(\text{foc}) = 100$ mm und 205 mm) und drei Köpfe mit $D = 50$ mm Linsendurchmesser (Kollimationsbrennweiten $f(\text{col}) = 125$ mm und 200 mm, Fokussierbrennweite $f(\text{foc}) = 200$ mm). Mit diesen Optiken lassen sich optische Vergrößerungen von $\beta = 1$ bis $\beta = 3,42$ realisieren. Es handelt sich in den meisten Fällen um Quarzlinsen, die als Zweilinsen (QD) oder als Einlinser (QS) ausgeführt sind. Die Strahlparameter wie Strahlqualität, Fokussdurchmesser und Fokusposition wurden mit dem von Primes hergestellten HighPower-MicroSpotMonitor (HP-MSM) im Diagnostikzentrum der FGSW gemessen. Das Messgerät ist mit einer internen Strahlabschwächung ausgerüstet, die es erlaubt grundmodenahe Laserstrahlen mit Leistungen bis zu mehreren Kilowatt zu vermessen.

Somit können Fokussdurchmesser bis hinunter zu $1 \mu\text{m}$ bei einer Leistung von bis zu 10 kW vermessen werden.

Fokussierbarkeit und Abbildungsqualität

Aufgrund von Unzulänglichkeiten der involvierten optischen Elemente, wie Linsen, Strahlteiler oder Schutzgläser, ist es nicht selbstverständlich, dass die Abbildungsqualität über das gesamte Leistungsspektrum beugungsbegrenzt bleibt. Dies hat zur Folge, dass die vom Laserhersteller angegebene Strahlqualität, in den meisten Fällen, nicht ohne Verschlechterung bis auf das Werkstück zu bringen ist. Insbesondere für Grundmode-Laser hoher Leistung kann dies zu einem gravierenden Problem werden. Die Folgen für den Anwender äußern sich insbesondere darin, dass der auf dem Werkstück erzielbare Strahldurchmesser signifikant größer ausfällt als erwartet. Diese Vergrößerung kann als Quotient aus tatsächlichem Fokussdurchmesser zu theoretischem Fokussdurchmesser dargestellt werden. In Abbildung 2 ist dieser Sachverhalt für fünf unterschiedli-

che Optiken dargestellt. Bei einer der vermessenen Optiken ist der tatsächliche Fokussdurchmesser zweimal so groß wie erwartet, was zu einer um den Faktor vier geringeren Leistungsdichte am Werkstück führt. Dies hat zur Folge, dass die übliche Berechnung des Fokussdurchmessers für fasergeführte Laserstrahlung, aus dem Faserkerndurchmesser multipliziert mit der optischen Vergrößerung des Linsensystems, für Hochleistungs-Grundmodelaser in den meisten Fällen keine realistischen Ergebnisse mehr liefert.

Laserinduzierter Fokus-Shift

Ein weiteres Problem, welches bei der Strahlformung mit Linsensystemen auftritt, ist der laserinduzierte Fokus-Shift. Dieser führt dazu, dass sich die Lage des Fokus entlang der Propagationsrichtung verschiebt. Durch Absorption von Laserleistung in den Beschichtungen der Linsen und Schutzgläser, oder in deren Grundmaterial selbst, wird ein Wärmeeintrag in die optischen Elemente hervorgerufen. Da die Wärme im

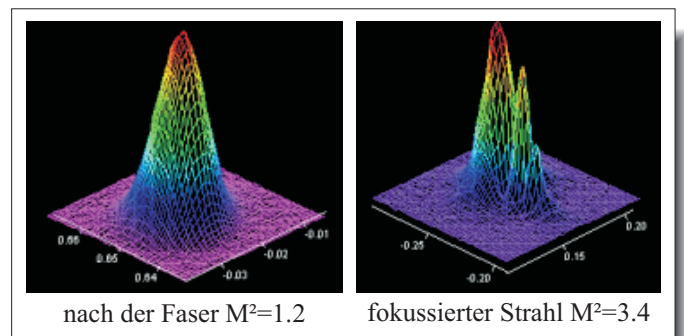


Abb. 1: Durch ungeeignete Optik stark verschlechtertes Intensitätsprofil.

Wesentlichen nur über den Rand der Linsen an das gekühlte Gehäuse abgegeben werden kann entsteht ein radialer Gradient der Temperaturverteilung, der wiederum zu einem radialen Gradienten im Brechungsindex der optischen Elemente führt. Daraus resultiert eine dem optischen System überlagerte thermische Linse, die eine Verschiebung der Fokusposition zur Folge hat. Je stärker dieser Effekt auftritt, desto schwieriger wird es die Fokuslage für einen bestimmten Prozess korrekt einzustellen. Abbildung 3 veranschaulicht diesen Effekt für kommerziell erhältliche Bearbeitungsköpfe dreier Hersteller mit unterschiedlichem Optikkonzept. Der Fokus-Shift ist zur besseren Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Optiken in Rayleigh-Längen (zR) aufgetragen. Ein Fokus-Shift von einer Rayleigh-Länge hat zur Folge, dass sich die Leistungsdichte auf der Werkstückoberfläche halbiert, wenn keine Korrektur der Fokuslage vorgenommen wird.

Konsequenzen

Durch neue grundmodenahe Laserstrahlquellen im

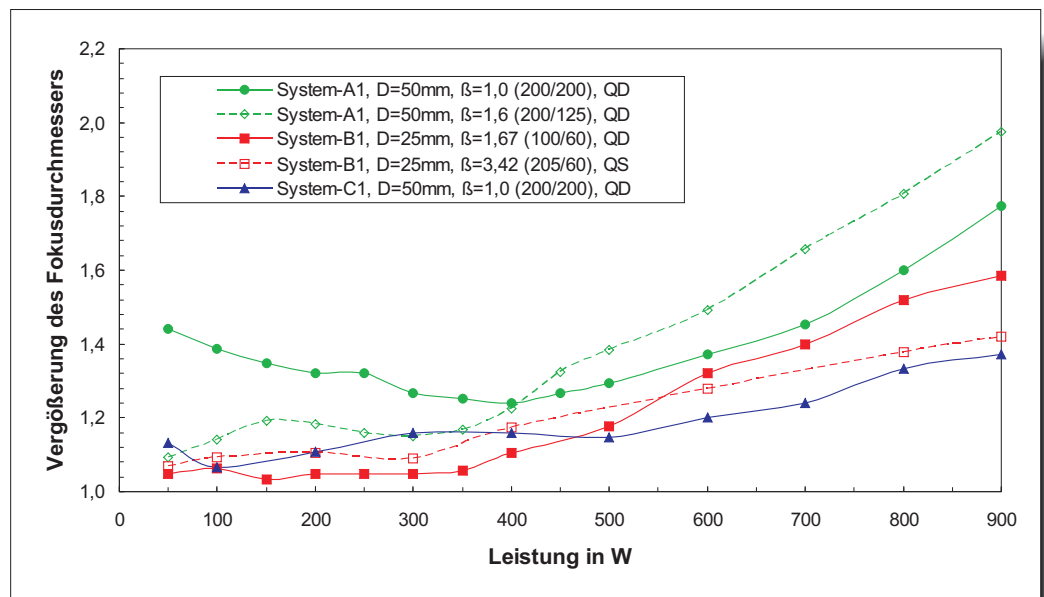


Abb. 2: Vergrößerung des tatsächlichen Fokusdurchmessers durch die begrenzte Abbildungsqualität des optischen Systems bei hohen Leistungen. D...Durchmesser der Linsen, β ...optische Vergrößerung, Werte in Klammern (Fokussierbrennweite / Kollimationsbrennweite),

Kilowatt-Bereich, werden an die verwendeten Bearbeitungsoptiken extrem hohe Anforderungen gestellt. Bei der annähernd beugungsbegrenzten Strahlqualität dieser Strahlquellen versagen die klassischen Methoden zur Berechnung des Fokusdurchmessers, was ein grundlegendes Umdenken auf Seiten des Anwenders erfordert. Da mit den meisten,

zur Zeit am Markt verfügbaren, Bearbeitungsoptiken die Strahlqualität nicht ohne signifikante Verluste bis an das Werkstück herangebracht werden kann ist eine explizite Qualifizierung der zu verwendenden Optiken unumgänglich. Auch die Staub- und Schmutzfreiheit von Linsen und Schutzgläsern stellt bei diesen Strahlquellen ein erhebliches Problem dar,

da sogar kleinste - mit bloßem Auge nicht sichtbare Verschmutzungen - zu einer weiteren signifikanten Verschlechterung der Strahlqualität und zu einer Erhöhung des Fokus-Shifts führen können. Durch Charakterisierung hochbrillanter Strahlung, mittels der Ressourcen des Diagnostikzentrums, ist die FGSW in der Lage Optiksysteme zu qualifizieren, um das volle Potential dieser Strahlquellen besser zu nutzen.

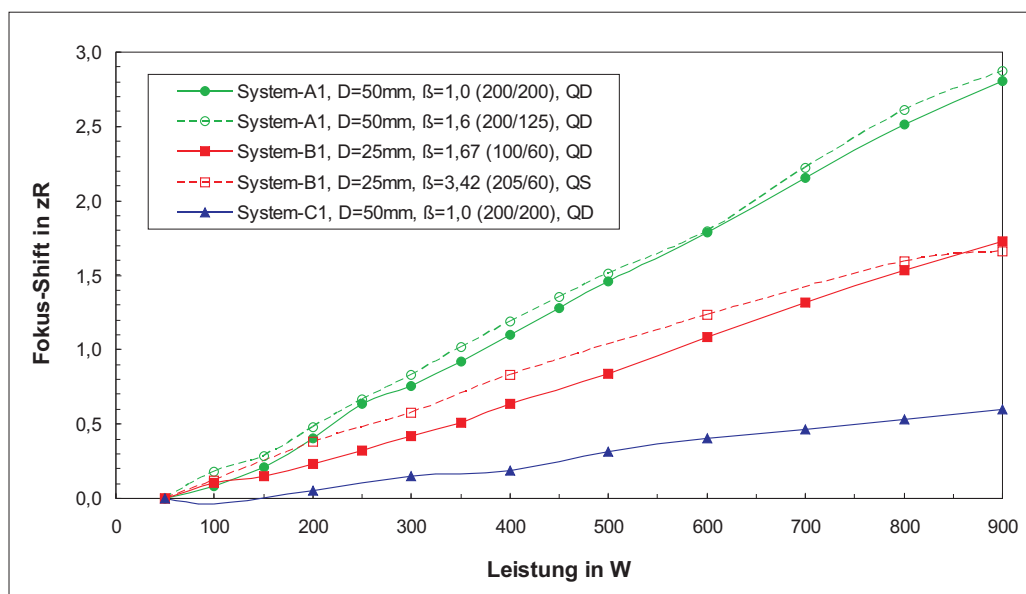


Abb. 3: Laser induzierter Fokus-Shift der Optiken dreier unterschiedlicher Hersteller, gemessen in Rayleigh-Längen.

Institutsadresse:
 Institut für Strahlwerkzeuge
 Pfaffenwaldring 43
 70569 Stuttgart
 Tel.: +49 (0)711 685 66840
 Fax: +49 (0)711 685 66842
<http://www.ifsw.uni-stuttgart.de>

Autoren:
 Dipl.-Ing. Felix Abt
felix.abt@fgsw.de
<http://www.fgsw.de>

Dipl.-Ing. Axel Heß
axel.hess@fgsw.de
<http://www.fgsw.de>

Kontakt / Redaktion:
 Dipl.-Phys. Thomas Liebig
 IFSW
 Tel.: +49 (0)711 685 67882
 Fax: +49 (0)711 685 66842
 E-Mail: thomas.liebig@ifsw.uni-stuttgart.de