Ultraschnelle Laserstrahlablenkung für Materialbearbeitungssysteme

Um die stetige Leistungssteigerung moderner Materialbearbeitungslaser möglichst effizient zu nutzen, wurde ein neuartiges Strahlablenkungssystem entwickelt, das bisher unerreichte Bearbeitungsgeschwindigkeiten bei höchster Präzision ermöglicht.

Bearbeitungsgeschwindigkeit

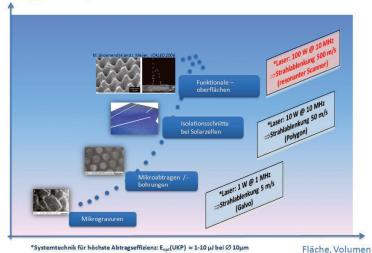


Bild 1: Skalierung der Ablenksysteme bei steigender Bearbeitungsfläche. Rechts im Bild die dafür notwendige Systemtechnik (Strahlablenkgeschwindigkeit und Laserparameter) für die Vorgabe 1-10 μJ bei Ø 10 μm auf der Probe

Thomas Herrmann, Florian Harth, Bernhard Henrich und Johannes L'huillier, Photonik-Zentrum Kaiserslautern e.V. (PZKL)

Die Lasermaterialbearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen ist heute ein etabliertes Verfahren in vielen industriellen Anwendungen und täglich kommen neue Anwendungsfelder hinzu. Der Trend geht zu immer größeren Bearbeitungsflächen, Abtragsvolumina und komplexeren Geometrien. Dazu ist neben leistungsstarken Lasersystemen eine ausgefeilte Systemtechnologie und hier vor allem eine schnelle Strahlablenkung notwendig. Bei den Ultrakurzpuls (UKP)-Lasersystemen konnten in den letzten Jahren beachtliche Innovationssprünge erzielt werden, so dass mittlerweile auch UKP-Laser mit über 100 W mittlerer Leistung zur Verfügung stehen. Der limitierende Faktor ist in vielen Anwendungen die präzise aber schnelle Strahlablenkung. Bereits heute

kann die mögliche Laserleistung oft nicht ausgeschöpft werden oder die Bearbeitung muss parallelisiert werden, was nur in ausgewählten Anwendungsfällen möglich ist.

Dieses Problem greift ein hier vorgestellter innovativer Ansatz auf, der schnelle resonante Scannersysteme mit neuartigen Ultrakurzpulslasern variabmisch mehrere 10 000 Mal pro Sekunde auf die momentane Geschwindigkeit des Spiegels synchronisiert, ermöglicht eine schnelle und gleichzeitig hochpräzise Bearbeitung. Bearbeitungsgeschwindigkeiten bis 1000 m/s mit einer Wiederholgenauigkeit von besser als 2 μ m wurden bereits mit einem Labormuster demonstriert.

Ausgangslage

Die Anforderungen an die Systemtechnik, speziell in der präzisen Lasermaterialbearbeitung mit ultrakurzen Pulsen, steigen zunehmend an. Zum einen werden die industriell verfügbaren UKP-Lasersysteme immer leistungsstärker -Ausgangsleistungen von einigen 100 W, die viele Millionen Laserpulse pro Sekunde aussenden, sind problemlos realisierbar. Zum anderen verlangen viele, auch etablierte Anwendungsfelder der Lasertechnik immer geringere Toleranzen und eine immer höhere Reproduzierbarkeit in der Produktion. Dies ist eine große Herausforderung an die Systemtechnik, speziell der Strahlablenk-

Bei Strahlablenkungssystemen für UKP-Laser gibt es ein paar Besonderheiten zu beachten: Ultrakurze Laser-

Strahlablenkung mit bis zu 1000 m/s - 2,4 Mio. Bearbeitungspunkte pro Sekunde

ler Pulswiederholrate kombiniert. Resonante Scanner erlauben sehr hohe Ablenkgeschwindigkeiten. Die inhärente nichtlineare Spiegelschwingung erlaubt jedoch mit heutigen Lasersystemen eine präzise Bearbeitung nur in einem sehr kleinen Bearbeitungsfeld, was nicht wirtschaftlich ist. Erst die Kombination mit einem Lasersystem, das seine Repetitionsrate über große Bereiche dyna-

pulse von einigen Pikosekunden bzw. Femtosekunden setzen ihre Pulsenergie innerhalb der Spotgröße auf dem Werkstück sehr lokal frei, da innerhalb der Pulsdauer nahezu keine Wärmeleitung stattfindet. Dies führt zu herausragenden Bearbeitungsqualitäten. Aufgrund fehlender Wärmeverluste im Wechselwirkungsbereich der Strahlung findet ein effizienter Abtrag schon bei relativ

Bilder: FEMOtech, PZKL

geringen Pulsenergien statt [1]. Betrachtet man nun verschiedene Anwendungen und deren Systemtechnik (Bild 1), erkennt man, dass bestehende Strahlablenksysteme schnell an ihre Grenzen stoßen. Fokussiert man z. B. die UKP-Laserstrahlung auf einen 10 μm Spotdurchmesser, so genügt eine Pulsenergie von nur 1 µJ, um metallische Materialien ohne Wärmeeinfluss zu ablatieren. Abhängig von der Anwendung bzw. der zu bearbeitenden Fläche wird also die Systemtechnik ausgewählt. Die Laserbearbeitung kleiner Flächen, wie z.B. bei Mikrogravuren oder kleinen Bohrungen, benötigt nur geringe mittlere Laserleistungen im einstelligen Wattbereich, eine Ablenkgeschwindigkeit im m/s-Bereich und relativ moderate Pulswiederholfrequenzen um wirtschaftlich zu sein. Die Anforderungen an die Systemtechnik sind zumeist moderat.

Die Situation ändert sich schon bei Isolationsschnitten an Halbleitern. Der Durchsatz für einen wirtschaftlichen Prozess ist höher, d. h. sowohl die Laserleistung als auch die Strahlablenkgeschwindigkeit müssen entsprechend skaliert werden. Bei zweidimensionalen Laserbearbeitungen, um beispielsweise größere Oberflächen zu funktionalisieren, ist eine zusätzliche Skalierung nötig. Die Laserleistung, die Pulswiederholrate und die Strahlablenkgeschwindigkeit müssen linear erhöht werden, um die Anforderungen an die präzise Bearbeitung aufrecht zu erhalten. Dies fordert bei entsprechend hochrepetierenden Lasersystemen dann Strahlablenksysteme einzusetzen, die auf der Probe den Laserstrahl mit 100 m/s und darüber ablenken. Eine große Herausforderung an die Systemtechnik.

Stand der Technik

Galvanometerscanner werden in unzähligen Anwendungen in der Lasertechnik zur Strahlablenkung eingesetzt. Typische Ablenkgeschwindigkeiten bei ortsgenauer Applikation eines Laserpulses auf dem Werkstück sind einige Meter pro Sekunde. Der Vorteil der Scanner liegt darin, dass beliebige Bahnkurven abgefahren werden können. Steigt nun die Pulswiederholrate von UKP-Lasern in den MHz-Bereich stoßen die Galvo-Systeme an ihre Grenzen, da die Ablenkgeschwindigkeit nicht mehr hoch genug ist.

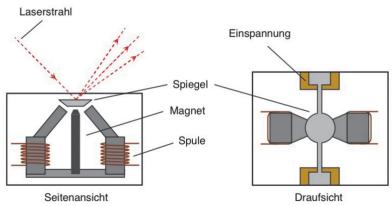


Bild 2: Prinzipskizze des resonanten Scanners

Eine Alternative zu den Galvoscanner stellen hier Polygonscanner dar. Rotierende Spiegelfacetten bewegen hier den Laserstrahl auf der Probe mit typischerweise 100 m/s, wobei das Werkstück grundsätzlich zeilenweise bearbeitet wird. Hybride Polygon-Galvo-Scanner mit integrierter Synchronisationsfunktionalität ermöglichen die exakte flächige Bearbeitung in Verbindung mit modernen hochrepetierenden UKP-Lasern [2].

Für eine weitere Reduzierung der Bearbeitungszeiten sind UKP-Lasersysteme mit Repetitionsraten von 10 MHz und mehr notwendig. Diese stehen grundsätzlich zur Verfügung. Die herkömmliche Ablenktechnik stößt hier allerdings an ihre Grenzen. Dies gilt insbesondere dann, wenn für die Applikation die Laserpulse räumlich getrennt werden müssen. Einen Überblick über die notwendige Ablenkgeschwindigkeit vSCAN, die man für hochrepetierende Lasersysteme benötigt, um einen Pulsüberlapp von 50 % (bspw. für Entschichtungsapplikationen) bzw. 0 % (Trennung der Laserpulse auf der Probe) zu realisieren, gibt Tabelle 1, berechnet für einen Spotdurchmesser von 10 μm. Mit einem Laser, der bei entsprechender Pulsenergie, 100 Millionen Laserpulse pro Sekunde emittiert (100 MHz), könnte eine Probe mit 500 m/s entschichtet werden (50 % Pulsüberlapp). Weder ein Galvanometerscanner, noch ein Polygonscanner lassen solche Bearbeitungsgeschwindigkeiten zu. Die Lösung ist ein resonanter Scanner.

Strahlablenkung mit Hilfe neuer resonanter Scannersysteme

In dem KMU-Innovativ Forschungsprojekt RESOMACH (zusammen mit den Partnern FEMOtech GmbH und abktechnology GmbH [3]) stand die Entwicklung eines schnellen resonanten Scanners für die Lasermikromaterialbearbeitung auf Basis einer neuartigen elektromagnetischen Antriebtechnologie im Mittelpunkt [4]. Für diesen Scanner sollte im Projekt auch die für die Laserbearbeitung notwendige Lasertechnologie und

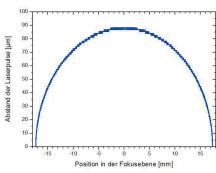


Bild 3: Abstand der Laserpulse auf einem Werkstück bei einer Ablenkung mit einem resonanten Scanner

PRF UKP-Laser	V _{SCAN} für Pulsüberlapp 50%	V _{SCAN} für Pulsüberlapp 0%	Ablenktechnik
1 MHz	5 m / s	10 m/s	Galvo
10 MHz	50 m / s	100 m/s	Polygon
100 MHz	500 m / s	1000 m/s	Resonanter Scanner

Tabelle 1: Skalierung der Ablenksysteme bei steigender Größe der Bearbeitungsfläche

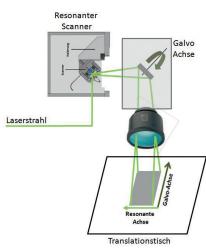


Bild 4: Skizze zur flächigen Bearbeitung mit einem resonanten Scanner

Prozesstechnik entwickelt werden. Bislang führen resonante Scanner ein Nischendasein in der Laserstrahlablenkung. Dies liegt hauptsächlich daran, dass den klaren Geschwindigkeitsvorteilen auch spezifische Nachteile bei der Technologie gegenüberstehen, die im Folgenden noch näher betrachtet werden.

Resonante Ablenksysteme ermöglichen bei Resonanzfrequenzen im kHz-Bereich und typischen Fokussierungsoptiken von 100 mm Brennweite maximale Ablenkgeschwindigkeiten des Laserstrahls auf der Probe von ca. 1000 m/s, allerdings handelt es sich bei der Bewegung um eine nichtlineare Schwingung. Im Unterschied zu nichtresonanten Scannern wie bspw. Galvanometerscannern, bei denen diskrete Spiegelpositionen angefahren werden

können, absolviert der resonante Scanner durch ein magnetisches Wechselfeld eine sinusförmige Torsionsschwingung um seine Längsachse (Bild 2). Die Ablenkgeschwindigkeit ändert sich somit von einem Maximum im Nulldurchgang (v ≥ 1000 m/s) bis zum Stillstand (v = 0 m/s) an den Umkehrpunkten. Dies bewirkt bei konstantem Zeitabstand der auftreffenden Laserpulse, d. h. konstanter Repetitionsrate des Lasers, dass der Abstand der Laserspots ohne eine entsprechende Kompensation in der Bearbeitungsebene nicht äquidistant ist, wie es die Grafik in Bild 3 darstellt (Punktabstand in der Fokusebene mit ZEMAX berechnet; Fokussierung mit telezentrischem F-Theta Objektiv F=100 mm; Scanner 8 kHz, Laser 10 MHz). Ein Umstand, der für eine Laserbearbeitung nicht tolerierbar ist.

In dem Forschungsverbund war das PZKL unter anderem dafür zuständig, Wege für die notwendige Kompensation der nichtlinearen Strahlablenkung zu finden. Dazu wurden verschiedene Alternativen analysiert bzw. untersucht. Neben einer Einschränkung des Scan-Feldes, um nur den linearen Bereich der Schwingung zu nutzen, waren dies eine passive Kompensation über Freiformoptiken und eine aktive Kompensation durch eine Laserquelle mit dynamisch variabler Repetitionsrate. Während eine Reduzierung des Scanfeldes nur für eingeschränkte Anwendungen möglich ist, sind geeignete Freiformoptiken am Markt nicht verfügbar und stellen dann auch nur eine Kompensation für eine spezielle Anwendung dar. Eine attraktive und sehr universelle Lösung des Problems ist die aktive Kompensation durch den Einsatz eines Lasers mit im Betrieb dynamisch variabler Repetitionsrate. Ein solches System ist am Markt bisher nicht verfügbar und stellt somit für konventionelle Konzepte ein nahezu unüberwindliches Hindernis dar.

Resonante Scanner und UKP-Laser mit variabler Pulswiederholrate

Im Rahmen von RESOMACH wurde mit dem Ziel resonante Scanner für die Lasermikromaterialbearbeitung nutzbar zu machen, ein UKP-Laser mit dynamisch variabler Pulswiederholrate zwischen 5 MHz und 10 MHz als Labormuster entwickelt. Mehrere zehntausend Mal pro Sekunde kann der gesamte Repetitionsratenbereich durchgefahren werden. Das Lasersystem besteht dabei aus einem Diodenlasersystem als Oszillator, der mit einer Grundrepetitionsrate von 1 GHz arbeitet. Die Pulsdauer liegt im Pikosekundenbereich. Aus dem Pulszug des Oszillators können nun einzelne Pulse ausgekoppelt werden, die in einem zweistufigen Verstärkersystem nachverstärkt werden. Die Ausgangsleistung liegt danach bei 180 W bei einer Laserwellenlänge von 1030 nm und nach einer Frequenzverdopplung stehen 120 W bei einer Laserwellenlänge von 515 nm zur Verfügung.

Mit den spezifischen Eigenschaften dieses Lasers kann die nichtlineare Schwingung des resonanten Ablenksystems größtenteils kompensiert werden:

- Der resonante Scanner dient als Master-Clock. Ein optischer Positionssensor an der Scannereinheit misst in Echtzeit die aktuelle Resonanzfrequenz und die aktuelle Position des Ablenkspiegels.
- Eine sehr schnelle Regelelektronik berechnet aus der aktuellen Position des Scannerspiegels und den Informationen über den Laserabtrag (bspw. ein Punktmuster) auf dem Werkstück, wann genau im weiteren Verlauf der Schwingperiode die Laserpulse von dem Lasersystem emittiert werden müssen.
- Das Lasersystem wird entsprechend den Daten der schnellen Regelelektronik synchronisiert, d. h. die aktuelle Pulswiederholrate wird kontinuierlich geändert. Die Pulswiederholrate kann dabei zwischen 5 MHz und 10 MHz der



Bild 5: Punktmuster (Streuzentren) eingebracht in transparentes Material, von unten mit grüner LED-Leiste beleuchtet

nichtlinearen Schwingung angepasst werden, die Auflösung beträgt entsprechend der Oszillatorfrequenz 1 GHz

Die "Granularität" mit der die Pulse selektiert werden können beträgt bei dem Laser 1 GHz oder anders ausgedrückt, die Laserpulse können für die Lasermikromaterialbearbeitung mit einer zeitlichen Auflösung von 1 ns ausgewählt werden. Beträgt die maximale Ablenkgeschwindigkeit im Zentrum des Arbeitsfeldes z. B. 1000 m/s, dann bedeutet dies wiederum eine räumliche Auflösung auf der Probe von 1 µm. Die nichtlineare Schwingung kann also mit Hilfe der aktiven Kompensation durch den Einsatz eines UKP-Lasers mit variabler Repetitionsrate fast vollständig linearisiert werden.

Ergebnisse und Anwendungen

Mit dem vorhandenen Setup, das mit einer zweiten Achse für die Ablenkung senkrecht zur Schwingungsebene des resonanten Scanners ausgestattet wurde, können nun Werkstücke flächig bearbeitet werden (Bild 4).

Dabei deckt die resonante Bewegungsrichtung aktuell Arbeitsfelder von 10 mm bis 30 mm ab, während der Arbeitsbereich senkrecht dazu ca. 50 mm beträgt. Anwendungen mit größeren Bearbeitungsflächen können durch Modifikation des Setups ebenfalls bedient werden. Besonders gut geeignet sind Rollezu-Rolle Prozesse, bei denen die ultraschnelle Bewegung in einer Richtung die Bearbeitungsprozesse besonders beschleunigen kann. Um die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems zu demonstrieren, wurden erste Bearbeitungsversuche im Arbeitsfeld des aktuellen Setups durchgeführt. Dabei wurde vollflächig ein Punkteraster mit dem Spotdurchmesser 10 µm und einem Punktabstand von 25 µm auf ein Werkstück geschrieben. Das Lasersystem arbeitete bei 5 MHz bis 10 MHz und die Pulswiederholrate wurde zur Bewegung des resonanten Scanners synchronisiert.

[1] B. Neuenschwander, Thorsten Kramer, B. Lauer, et al., "Burst mode with ps- and fs-pulses: Influence on the removal rate, surface quality, and heat accumulation", Proceedings of SPIE Vol. 9350, 93500U (2015)
[2] www.scanlab.de/sites/default/files/PDF-Datien/Allgemein-SCANLAB/Projekte/Projekt%20Ultralas_DE.pdf
[3] www.femotech.de und www.abk-technology.de
[4] Resonanter Scanner für die Lasermikromaterialbearbeitung auf Basis einer neuartigen Antriebstechnologie – RESOMACH, KMU Innovativ, Förderkennzeichen 13N12616

Die eruierten Ergebnisse sind:

- Maximal 2,4 Millionen geschriebene Punkte oder Laserabträge pro Sekunde
- Die Positioniergenauigkeit lag bei ca. 1 µm bei mehrfacher Überfahrt

Wie oben erwähnt können einzelne Arbeitsfelder nach der ultraschnellen Bearbeitung auch aneinandersetzt werden, wie dies exemplarisch in **Bild 5** für ein Punktmuster in einem transparenten Medium dargestellt ist.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Strahlablenkung mit neuartigen resonanten Scannern wurde untersucht und dabei Lösungen erarbeitet und umgesetzt, die eine Linearisierung der nichtlinearen Ablenkbewegung des Scanners auf dem Werkstück ermöglicht. Dazu wurde ein UKP-Laser mit dynamisch variabler Pulswiederholrate zwischen 5 MHz und 10 MHz als Labormuster entwickelt. Mit Hilfe einer schnellen Steuerungselektronik kann die Pulswiederholrate des Lasers mit der Schwingung der Scannerspiegel synchronisiert und so angepasst werden, dass ein äquidistanter Laserabtrag auf einer Probe möglich wird. Aufgrund der schnellen Strahlablenkung mit 1000 m/s und der hohen Pulswiederholrate des Lasers von bis zu 10 MHz, können mit dem realisierten Aufbau mehr als 2 Millionen Punkte pro Sekunde auf einem Werkstück mit einer Positioniergenauigkeit von 1 µm geschrieben werden. Dies stellt eine neue Dimension dar im Vergleich zu herkömmlichen Ablenksystemen, die mit einigen 1000 Punkten pro Sekunde arbeiten.

Aktuell wird das neuartige Lasersystem im Rahmen des ZIM-Projektes "Hi-PoRep" weiterentwickelt, um gemeinsam mit zusätzlichen Projektpartnern den Anwendungsbereich durch neue und verbesserte Eigenschaften zu vergrößern und es zur Marktreife zu bringen.

Kontakt

www.pzkl.de

Dr. Thomas Herrmann Photonik-Zentrum Kaiserslautern e.V. Kohlenhofstr. 10 D-67663

Tel.: +49 631 415575 14 thomas.herrmann@pzkl.de

