

TAIFUN - Mikropräzisionsbohrungen durch den richtigen Dreh

Die neu entwickelte IFSW Strahlrotationsoptik TAIFUN ist eine systemtechnische Komponente für das Mikropräzisionsbohren mit kurz und ultrakurz gepulster Laserstrahlung. Sie bewegt den Laserstrahl auf einer kreisförmigen Bahnkurve über das Werkstück und rotiert dabei das Strahlprofil. Die Strahlrotationsoptik dient der Fertigung rotationssymmetrischer Mikrobohrungen, wie sie für Düsen in der Einspritz-, Dosier- und Textiltechnik benötigt werden. Bei diesen Anwendungen liegen die Bohrungsdurchmesser meist zwischen 50 µm und 500 µm bei Materialstärken zwischen 200 µm und 1 mm. Sowohl die Durchmesser selbst als auch die Rundheiten von Düsenbohrungen werden meist eng toleriert, was die Rotation des Strahlprofils zusätzlich zur Rotation der Strahlposition zu einer besonders wichtigen Eigenschaft des TAIFUN macht. Durch eine Strahlanstellung beim Bohren ist es weiterhin nicht nur möglich, zylindrische Bohrungen herzustellen, sondern auch gezielt positive ($d_{\text{Eintritt}} > d_{\text{Austritt}}$) oder negative Konizitäten ($d_{\text{Eintritt}} < d_{\text{Austritt}}$) zu erzeugen.

Das Lasermikrobohren wird am IFSW seit dem Ende der 90er-Jahre schwerpunktmäßig und sehr erfolgreich erforscht (siehe Abb. 1). Während das Mikrobohren mit langgepulsten Strahlquellen im industriellen Einsatz weit verbreitet ist, entwickelt sich das Know-how zum Mikrobohren mit ultrakurzen Pulsen aber immer noch begrenzt auf wenige Forschungseinrichtungen und F&E-Abteilungen von Laseranwendern. Bis heute steht eine Großserienanwendung des Ultrakurzpuls-Bohrens aus, was lange Zeit durch den Mangel an leistungsstarken und industrietauglichen Ultrakurzpuls-Lasersystemen begründet war. Seit 2008 sind entsprechende Strahlquellen jedoch kommerziell verfügbar. Auch die notwendige Verfahrens- und Systemtechnik wurde im Rahmen zweier BMBF-Projekte – PRIMUS und PROMPTUS – geschaffen und stetig weiterentwickelt.

Angefangen bei einem Wendelbohrsystem mit manueller Verstellung der Wendelparameter wurde über eine halbautomatische Version schließlich die kommerziell erhältliche vollautomatische Wendelbohrsysteme (WBO) mit SPS-Steuerung als serienreife Version entwickelt. Diese Systeme basieren auf dem optischen Prinzip der rotierenden Keilplatten und arbeiten daher ohne Strahlprofil- oder Bildrotation. Zusammen mit den Projektpartnern wurde der Bohrprozess insgesamt so weit entwickelt, dass heute beim hochpräzisen Mikrobohren mit Ultrakurzpuls-Lasern serienreife Qualitäten und Prozesszeiten ohne Nachbearbeitung erzielt werden. Wendelbohrsysteme, wie die WBO oder die neu entwickelte TAIFUN-Optik, sind als systemtechnische Komponenten in Bearbeitungsanlagen für das Mikropräzisionsbohren unverzichtbar. Wenngleich der Markt für solche Systeme

zurzeit erst in Form eines Nischenmarktes mit weniger als fünf Anbietern weltweit existiert, könnte ein erster Serieneinsatz des Bohrens mit ultrakurzen Pulsen als Startschuss für eine breite Anwendung von Wendelbohrsystemen in den eingangs genannten Technologiefeldern wirken.

Die optische Einheit des TAIFUN besteht aus einem rotierenden Linsensystem zur Erzeugung der Strahlrotation sowie einem Strahlpositionierungssystem zur Einstellung und automatischen Stabilisierung der Wendelparameter. Im Strahlführungssystem einer Laserbearbeitungsanlage wird der Strahlrotator an einer beliebigen Stelle vor der Fokussieroptik positioniert. Mit Hilfe des Linsensystems, welches in einem Hohlwellenmotor angeordnet ist, wird der Laserstrahl in eine Rotationsbewegung versetzt und damit auf der Fokussieroptik sowie

schließlich auf dem Werkstück auf einer kreisförmigen Bahnkurve bewegt. Das PC-gesteuerte Strahlpositionierungssystem (Beam-Lock 4D der Firma TEM Messtechnik) stabilisiert, verkippt und versetzt den Strahl vor dem Eintritt in das Teleskop und erlaubt so die unabhängige und stufenlose Einstellung des Wendeldurchmessers und des Strahlanstellwinkels sowie die Änderung dieser Parameter während des Bohrprozesses. Dadurch ermöglicht der Strahlrotator nicht nur die gezielte Beeinflussung der Kapillargeometrie, sondern bietet darüber hinaus größtmögliche Freiheit bei der Zusammenstellung komplexer Verfahrensstrategien. Durch die Rotation des Strahlprofils lassen sich selbst bei stark unrunder Intensitätsverteilungen engste Rundheitstoleranzen einhalten.

Um das Prinzip der Strahlprofilrotation mittels des

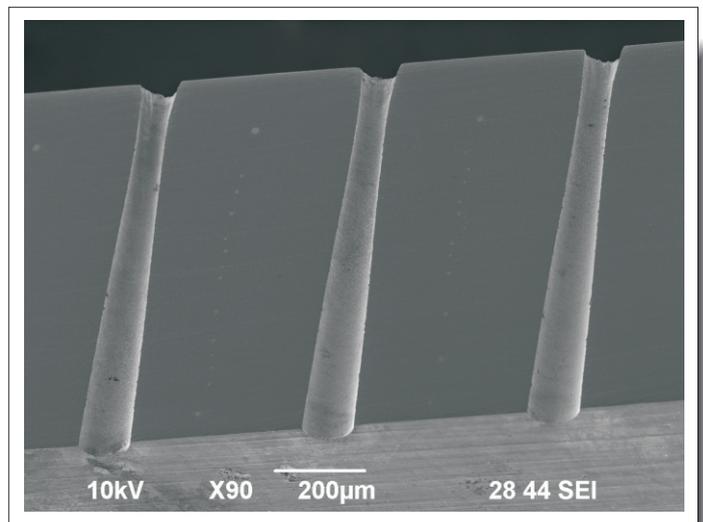


Abb. 1: Negativ konische Ultrakurzpuls-Bohrungen in Stahl, gefertigt mit der WBO, Bearbeitungsdauer je 10 s

Linsensystems zu evaluieren, wurden Computersimulationen der Funktionalität durchgeführt. Dazu wurden sowohl strahlenoptische als auch wellenoptische Rechnungen (u. A. mit VirtualLab der Firma LightTrans) durchgeführt. Erst mittels der wellenoptischen Rechnungen konnte sichergestellt werden, dass sich die Strahlqualität bei geeigneter Wahl der Linsen durch die TAIFUN-Optik nicht verschlechtert. Zur Veranschaulichung des Effektes der Strahlprofilrotation ist in Abbildung 2 exemplarisch die Wirkungsweise der Optik anhand einer TEM_{01} Mode als Eingangsintensitätsverteilung dargestellt. Offensichtlich bleibt diese Mode bei der Transmission erhalten – die räumlich gemittelte Intensität bei Betrieb der Optik resultiert jedoch in einer perfekt rotationssymmetrischen Form (rechts). Bereits unter Verwendung eines Prototypen konnten Bohrungen in Edelstahlproben mit hervorragender Rundheit unter Verwendung von Laserpulsen bei einer Wellenlänge von 1064 nm bei 160 ns Pulsdauer erzeugt werden (Abb. 2). Die Strahlrotation mit Hilfe eines rotierenden Linsensystems stellt einen neuen optischen Ansatz für das Laserbohren dar, der im Jahr 2006 durch das IFSW zum Patent angemeldet wurde. Verglichen mit dem bekannten

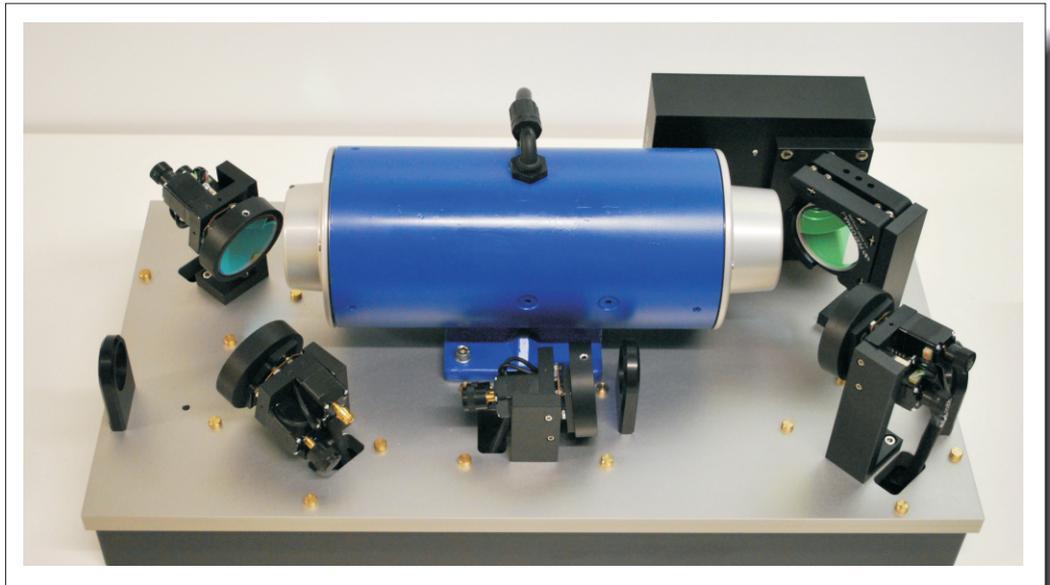


Abb. 3: Prototyp der TAIFUN Strahlrotationsoptik

Prinzip der Bildrotation durch ein Dove-Prisma hat die Lösung mit Linsen zwei gravierende Vorteile – die Strahlableitung ohne Totalreflexion und ein kürzerer Strahlweg im Glas. Die Vermeidung von Reflexionen ist wichtig im Hinblick auf die Erhaltung der Polarisation, während kurze Wege im Glas das Auftreten nichtlinearer Effekte bei der Bearbeitung mit ultrakurzen Pulsen verringern. Letzteres ist insbesondere bei der Verwendung von Pulsdauern im Femtosekundenbereich von großer Bedeutung. Eine weitere Neuerung besteht darin, dass das in den optischen Aufbau des Strahlrotators integrierte Beam-

Lock System nicht nur eine Strahlpositionierung, sondern auch eine automatische Strahlage stabilisierung ermöglicht. Es leistet also die Einstellung der Wendelparameter, kann gleichzeitig aber auch kurzzeitige Strahlageinstabilitäten und eine Langzeitdrift des gesamten optischen Aufbaus kompensieren. Beide Punkte sind wesentlich für das Erzielen reproduzierbarer Ergebnisse im Serieneinsatz. Schließlich erlaubt die kleine bewegte Masse und die Tatsache, dass keine beweglichen Teile rotiert werden, prinzipiell die Steigerung der Umdrehungsfrequenz des Hohlwellenmotors auf viele 10.000 Umdrehungen pro

Minute, was vor allem für die Fertigung von Bohrungen mit großen Durchmessern von mehreren Millimetern wichtig sein kann. Für die Messe Laser World of Photonics 2009 wurde der in Abb. 3 dargestellte Prototyp des Strahlrotators mit einem kompakten optomechanischen Aufbau und einer einfachen Ansteuerung aufgebaut und im Betrieb präsentiert. Die Weiterentwicklung des Prototypes zu einem serienreifen System ist in Zusammenarbeit mit einem kommerziellen Entwicklungspartner vorgesehen.

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

Autoren:
 Dipl.-Phys. Andreas Michalowski
andreas.michalowski@ifsw.uni-stuttgart.de
 Dipl.-Ing. Martin Kraus
 Dr. Rudolf Weber

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

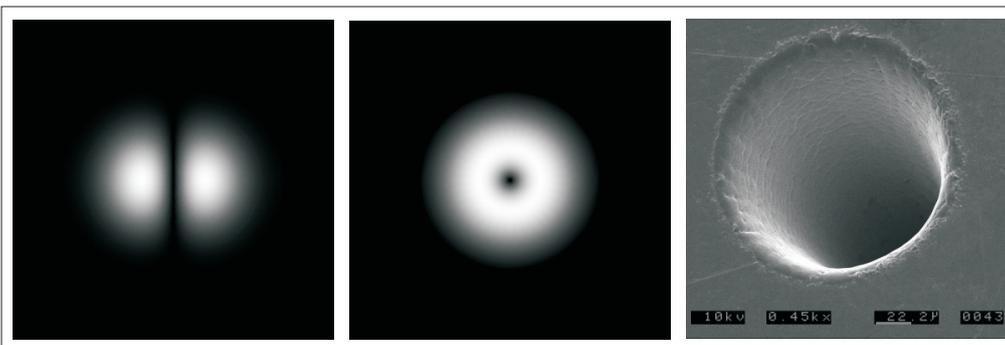


Abb. 2 links: TEM_{01} Mode des Laserstrahls bleibt beim Durchgang durch die stillstehende TAIFUN Optik erhalten
 Mitte: Rotation der Optik generiert im zeitl. Mittel rotationssymmetrisches Strahlprofil
 rechts: Exemplarisches Bohrerergebnis (Eingang) in Stahl