

Prozessüberwachung in der abtragenden Mikromaterialbearbeitung mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung

Mikromaterialbearbeitung mit gepulster Laserstrahlung erlebt vor allem in den letzten Jahren einen rasanten Aufschwung in zahlreichen Bereichen der industriellen Fertigung. Neben der hohen Flexibilität, der Automatisierbarkeit und der erzielbaren Qualität, die dieses Verfahren gegenüber konkurrierenden Verfahren auszeichnet, ist zur Zeit vor allem die Steigerung der Wirtschaftlichkeit ein Gegenstand intensiver Forschung. Bei der Umsetzung der hohen Wirtschaftlichkeit wird dabei der Prozessüberwachung neben der Verfahrensentwicklung eine zentrale Rolle zugeordnet. Erst durch den Einsatz eines automatisierten Überwachungssystems lassen sich eine hohe Reproduzierbarkeit, eine Reduzierung des Ausschusses und eine Verkürzung der Bearbeitungsdauer sicherstellen. Ein wesentliches Ziel im Rahmen des Verbundprojektes PROMPTUS („Produktive Mikro-Prozess-Technik mit ultrakurz-gepulsten Strahlquellen“) ist es daher, detaillierte Ansatzpunkte für eine Prozessüberwachung zu erarbeiten und ihre Eignung zur Prozesssicherung oder -kontrolle einzustufen.

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Verbundprojektes PRIMUS wurde das enorme Potential ultrakurzer Laserpulse hinsichtlich der hohen erzielbaren Bearbeitungsqualität demonstriert. Aufgrund der extrem kurzen Pulsdauer werden im Laserfokus hohe Intensitäten erreicht, wodurch die Entstehung von Schmelze deutlich minimiert wird und durch geeignete Bearbeitungsstrategien bis auf vernachlässigbares Maß gesenkt werden kann. Die Vermeidung der qualitätsmindernden Effekte hatte allerdings zur Folge, dass die notwendigen Prozesszeiten stark anstiegen und die Verfahren daher noch nicht in der Produktion einsetzbar waren. Gesamtziel des Nachfolgeprojektes PROMPTUS ist es daher, durch Optimierung der Prozessführung, der Verfahrensstrategien und durch geeignete Systemkomponenten die Prozessproduktivität unter Beibehaltung der hohen erzielbaren Qualität zu steigern und

die Bearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen industriell einsetzbar zu machen. Neben den genannten Schwerpunkten enthält dieses Projekt einen weiteren Arbeitspunkt, der sich mit Prozessüberwachung und Prozesssicherung beschäftigt. In diesem Bereich sollen verschiedene Ansätze für eine Prozesskontrolle zunächst aus physikalischer Sicht evaluiert und anschließend hinsichtlich ihres Potentials für den industriellen Einsatz bewertet werden. Auf dem Gebiet der Mikromaterialbearbeitung mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung existiert, im Gegensatz zu den bereits seit vielen Jahren etablierten Fertigungsverfahren wie dem Laserstrahlschweißen oder Laserstrahlschneiden, eine unzureichende Anzahl an experimentell erprobten oder gar in der Fertigung eingesetzten Messverfahren bzw. Überwachungsmethoden. Dies ist zum Einen auf die außerordentliche Komplexität des Bearbei-

tungsprozesses zurückzuführen. Während der Verdampfung und Austreibung des abgetragenen Materials laufen in kleinsten räumlichen Abmessungen und auf extrem kurzen Zeitskalen verschiedene hochdynamische Wechselwirkungen und Prozesse ab. Zum Anderen bestehen für viele spezielle Anwendungen, wie z.B. das Bohren von Dieseleinspritzdüsen im KFZ-Bereich, weitere Anforderungen an die räumliche Anordnung der Sensoren während der Bearbeitung. Vor allem aufgrund der stark eingeschränkten Zugänglichkeit der Bauteilrückseite wird die Positionierungsmöglichkeit des Überwachungssystems in solchen Fällen erheblich eingeschränkt. Die Untersuchungen auf dem Gebiet der Prozessüberwachung im Projekt PROMPTUS beziehen sich überwiegend auf die Einsatzgebiete des Mikrostrukturierens und Präzisionsbohrens (Abb.1). Eines der zentralen Ziele besteht darin möglichst in Echtzeit die wichtigsten Charakteristika

eines Bohrprozesses wie die aktuelle Bohrungstiefe, den Zeitpunkt des Bohrungsdurchbruchs durch die gesamte Materialstärke, oder die Aufweitung der Austrittsöffnung, sowie maßgebliche Größen wie die Abtragtiefe und -breite beim Oberflächenstrukturieren zu erfassen. Weiterhin soll detektiert werden, ob ein einzelner Bearbeitungsprozess fehlerbehaftet ist und zu einem Ausschussbauteil führt.

Überwachung der prozessrelevanten Bearbeitungsphasen und -größen

Bei der Materialbearbeitung mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung entstehen im Bereich der Bearbeitungszone laserinduzierte Stoßwellen, die sich vom Bohrungsgrund aus in das Umgebungsgas über der Werkstückoberfläche hemisphärisch ausbreiten. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der Ausbreitungscharakteristik dieser Wellen erlauben Rückschlüsse auf verschiedene Stadien des Laserbohrprozesses. Wird der zeitliche Abstand zwischen

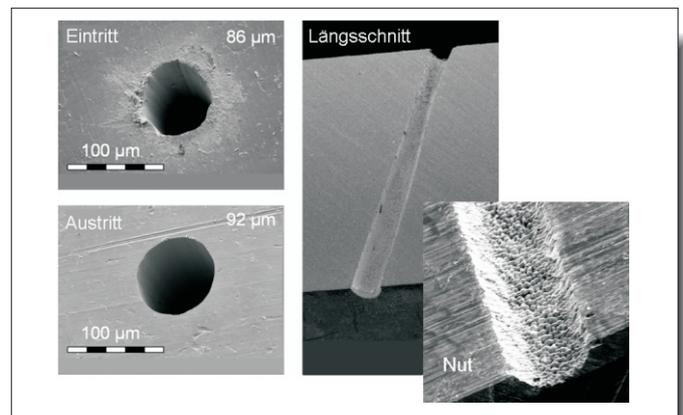


Abb. 1: Ein- und Austritt sowie Längsschnitt durch eine Bohrung in Stahl, hergestellt mit einem ps-Lasersystem (links). Querschnitt durch eine Oberflächenstruktur in Stahl (rechts).

dem Aufnahmezeitpunkt und dem Laserpuls konstant eingestellt, so nimmt der Radius der Stoßwellenfront kontinuierlich mit zunehmender Bohrungstiefe ab. Dieses Verhalten lässt sich über die Abnahme der effektiven Pulsenergie am Bohrungsgrund mit wachsender Bohrungstiefe erklären. Neben der Überwachung der Bohrungstiefe erlaubt dieses Messverfahren weiterhin die Überwachung des Durchmessers der Austrittsöffnung. Nach dem Erreichen des maximal erzielbaren Austrittsdurchmessers können aufgrund des zum Erliegen gekommenen Materialabtrags über der Werkstückoberfläche keine Stoßwellen mehr erfasst werden. Anhand dieses ausgeprägten Verhaltens findet eine empfindliche und präzise Detektion des Prozessendes statt. Mit einem weiteren, auf optischen Prozessemissionen basierenden Überwachungsansatz lassen sich mehrere charakteristische Prozessphasen beim Bohren (Bohrungsdurchbruch und Prozessende) und Strukturabmessungen beim Abtragen detektieren. Die Erfassung der Prozessemissionen erfolgt dabei durch einen Einzeldetektor in coaxialer Anordnung zur Bohrungsachse. Somit ermöglicht ein solcher Aufbau eine Aufnahme der Prozesssignale auch aus Bohrungen mit hohem Aspektverhältnis (Verhältnis der Tiefe zum Durchmesser). Die Intensität des Prozessleuchtens ist dabei in hohem Maße von der momentanen

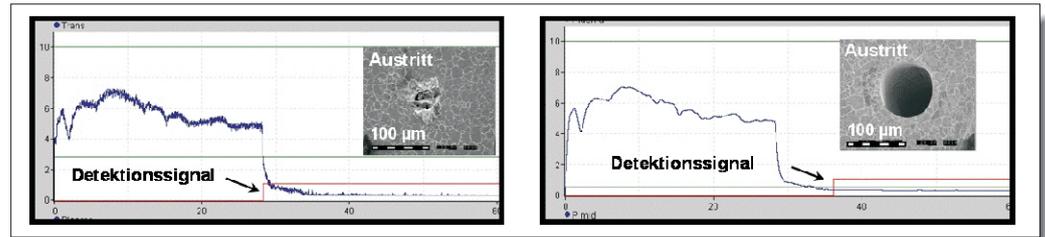


Abb. 2: Zeitlicher Verlauf des Sensorsignals während des Bohrprozesses. Je nach Prozessphase wurden unterschiedliche Auswertalgorithmen zur Bestimmung des Bohrungsdurchbruchs (links) bzw. Prozessendes (rechts) herangezogen.

Bohr- bzw. Abtragsrate abhängig, welche ihrerseits stark mit den zu überwachenden Größen korreliert. Aus dem zeitlichen Verlauf der Signalintensität lassen sich beim Bohren durch Verwendung angepasster Auswertalgorithmen wichtige Prozessphasen wie der Bohrungsdurchbruch und die vollständige Aufweitung der Austrittsöffnung während der Bearbeitung identifizieren (siehe Abb. 2).

Neben der kamerabasierten Erfassung von laserinduzierten Stoßwellen und der Aufnahme spektral breitbandiger optischer Prozessemissionen sind im Laufe der experimentellen Untersuchungen vielversprechende Ergebnisse durch den Einsatz von Schall- und Körperschallsensoren erzielt worden. Mit diesen Messsystemen lassen sich sowohl verschiedenen Prozessphasen beim Laserbohren als auch Rückschlüsse auf die Abtragstiefe bzw. breite beim Strukturieren technischer Oberflächen ableiten. Eine erforderliche Kopplung des Sensorelementes an die Bearbeitungsoberfläche setzt jedoch den Flexibilitäts-

grad solcher Messverfahren herunter.

Umsetzung der Messverfahren als Echtzeit-Überwachungssystem

Eine Echtzeit-Überwachung verschiedener Prozessphasen beim Bohren mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung konnte durch coaxiale Erfassung des breitbandigen optischen Prozessleuchtens realisiert werden. Das Überwachungssystem wurde beim Bohren von Bauteilen auf seine Zuverlässigkeit hin erprobt und den mit einem aus unregelmäßigem Bearbeitungsprozess erzielten Ergebnissen gegenüber gestellt. In diesem Zusammenhang wurde das System dazu eingesetzt, den Bohrprozess zum Zeitpunkt des Bohrungsdurchbruchs durch das Abschalten der Laserquelle zu beenden. Damit wurde der Übergang vom reinen Überwachungssystem zum aktiven Regelungsprozess vollzogen. Die gesamte Überwachungseinheit umfasst einen Einzeldetektor in Kombination mit einem entsprechend dem spektralen Bereich der Prozessemissionen angepassten Filter, wodurch eine kompakte Bauweise und eine hohe Integrierbarkeit in eine Bearbeitungsanlage realisiert werden können. Die Messdaten werden von einer zentralen Datenverarbeitungseinheit erfasst, digitalisiert, visualisiert und ausgewertet. In Abbildung 3 sind die lichtmikroskopischen Aufnahmen von Bohrungsaustritten dargestellt, wobei in einem Fall (linke Darstellung) die Bearbeitung mit einer fest

vorgegebenen Pulsanzahl ohne Regelung durch das Sensorsystem durchgeführt wurde. Im zweiten Schritt wurde das Prozessleuchten durch eine coaxial angeordnete Fotodiode erfasst und die Bearbeitung nach Erfüllung von vordefinierten Auswertekriterien unterbrochen (rechte Darstellung). Die Gegenüberstellung der beiden Ergebnisse verdeutlicht eindrucksvoll, dass eine Echtzeit-Überwachung des Bohrprozesses aufgrund seiner Komplexität unerlässlich ist. Bei der Mikromaterialbearbeitung mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung spielt die Prozessüberwachung neben der Verfahrensentwicklung eine wichtige Rolle für einen erfolgreichen Einsatz dieses Fertigungsverfahrens im industriellen Umfeld. Eine Kombination der vorgestellten Überwachungsmethoden zu einem multimodalen Ansatz würde die Aussagekraft des Systems weiter erhöhen und die Zuverlässigkeit steigern.

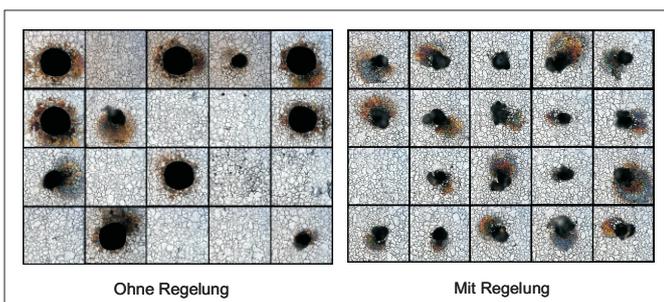


Abb. 3: Lichtmikroskopische Aufnahmen von Bohrungsaustritten in einer Stahlprobe, ohne und mit einer automatischen Regelung.

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>

Autor:
 Dipl.-Phys. Dmitrij Walter
dmitrij.walter@ifsw.de
<http://www.ifsw.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