

1 Einleitung

Das Laserstrahlbohren ist einer der ältesten und am weitesten industriell verbreiteten Verfahren in der Lasermaterialbearbeitung. Anwendungen finden sich in der Luftfahrttechnik, dem Energiesektor, im Werkzeugbau und Automobilbau [DÜRR08], [RAPPO2], [MEI02], [BECK11], [LEI03]. Die industriell seit langem etablierten Bohrverfahren verwenden meistens lange Pulse im Millisekundenbereich, welche zum Aufschmelzen des Materials mit anschließendem Austrieb der Schmelze führen. Jedoch wird die geometrische Präzision über die Schmelzbildung und Schmelzdyamik limitiert. Außerdem führt die thermische Belastung des Materials durch den Bohrprozess zu Defekten wie Rissbildung, wodurch beispielsweise die Lebensdauer von Turbinenkomponenten durch die Einbringung von Kühlluftbohrungen signifikant reduziert wird [EBRA18, S.82–83], [KLAB03, S.106].

Neben der schmelzbasierten Lasermaterialbearbeitung hat sich die Entwicklung in den letzten 20 Jahren auf den Materialabtrag mittels ultrakurzen Laserpulsen fokussiert. Dieser Ultrakurzpuls (UKP)-Abtrag ermöglicht einen sehr präzisen, quasi schmelzfreien Abtrag ohne thermische Belastung. Dieser geht allerdings zu Lasten einer geringen Abtragrate [KAUT94, S.610], [NOLT97, S.2721]. Neben dem oberflächennahen Abtrag findet auch das Bohren Anwendung bei der Bearbeitung mittels UKP-Laserstrahlung. Mit dem Wendelbohren wurde für Mikrobohrungen ein eigenes Bohrverfahren mit speziellen, sogenannten Wendelbohroptiken entwickelt. Diese Optiken für die Erstellung von präzisen, schmelzfreien Bohrungen haben bereits einen festen Platz in der industriellen Fertigung. Typische Einsatzbereiche von UKP-Mikrobohrungen sind bei der Herstellung von Einspritzdüsen, Tintenstrahl Druckern, Elektronikkomponenten und Belüftungsbohrungen zu finden [SUGI14, S.8], [KÖNI06, S.1], [EIMA03], [HAMM18, S.14]. Die kleinen mittleren Leistungen der Laserstrahlquellen, eine geringe Abtragrate und weitere UKP-bohrspezifische Phänomene führen jedoch auch aus wirtschaftlichen Gründen zu geometrischen Begrenzungen der Mikrobohrungen typischerweise auf Durchmesser $<100\text{ }\mu\text{m}$ und Materialdicken unterhalb von 1 mm [MINC17, S.4], [DAS09, S.5668]. Durch die Entwicklung von industriell verfügbaren Laserstrahlquellen mit hohen Pulsenergien und hohen mittleren Leistungen in den letzten Jahren wurden die Voraussetzungen geschaffen, die einen Einsatz von UKP-Laserstrahlung und den damit verbundenen Vorteilen auch bei weiteren Anwendungen denkbar werden lässt. Präzise, geformte Mikrobohrungen mit mehreren Millimetern Tiefe werden insbesondere in vielen Hochtechnologieanwendungen wie beispielsweise als Kühlluftbohrungen in Turbinenkomponenten, in Spinddüsen für die Faserherstellung, als Zuführung von Schmiermitteln in (Umform-)Werkzeugen oder für die Herstellung von Sieben für die Stoffaufbereitung benötigt. Diese Anwendungen können mit aktuellen Verfahren wie Langpuls-Laserbohren, Funkenerosion oder mechanisches Bohren nicht oder nur eingeschränkt adressiert werden.

Zur Erstellung von UKP-Bohrungen mit großen Bohrtiefen von 5 mm und mehr, wie sie bei den etablierten Langpulsverfahren erreicht werden, sind kaum Grundlagenuntersuchungen durchgeführt worden. Denn bisher sind Laserstrahlquellen mit entsprechenden Pulsenergien

und mittleren Leistungen industriell nicht verfügbar. Nur in einzelnen, relativ neuen Veröffentlichungen werden Bohrtiefen von über 5 mm mit Forschungslasern mit sehr hoher Pulsenergie erreicht [FÖRS18, S.11552], [HENN20, S.2520], [ZAHE19, S.5]. Da hier das Perkussionsbohren als Bohrtechnik verwendet wird, werden weiterhin konische Bohrungen erzeugt, deren Form nicht genau einstellbar ist. Bestehende Wendelbohroptiken könnten Abhilfe bieten, diese sind jedoch nicht für die großen Bohrungsgeometrien, hohen Laserleistungen und hohen Abtragraten ausgelegt.

In dieser Arbeit wird daher untersucht, inwieweit mit UKP-Laserstrahlung sehr tiefe, zylindrische Bohrungen hergestellt werden können. Je nach Wahl des Bohrverfahrens werden vor allem hohe Pulsenergien oder hohe mittlere Leistungen zum Erreichen der Bohrtiefe benötigt, weshalb ein Fokus in den Untersuchungen auf den Einfluss dieser Parameter auf den Abtrag- und Bohrprozess gelegt wird. Dafür wird eine industriell verfügbare Laserstrahlquelle der neuesten Generation verwendet, welche die genannten Laserparameter zur Verfügung stellen kann und in den kommenden Jahren verbreitet verfügbar sein wird. Auf Basis der grundlegenden Untersuchungen wird dann die Eignung verschiedener Bohrverfahren für ein möglichst produktives Tiefbohrverfahren mittels UKP-Laserstrahlung untersucht und bewertet. Die Anforderungen zur Strahlauslenkung zum Tiefbohren werden anschließend in ein Optikkonzept übertragen, mit welchem ein Bohrverfahren zum Erreichen der geforderten tiefen, zylindrischen Bohrungen entwickelt und charakterisiert wird.