

Verfahrensstrategien für Bohrungen hoher Präzision mittels Laserstrahlung

von Dr.-Ing. Thomas Wawra
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

D93

Als Dissertation genehmigt von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Friedrich Dausinger
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Uwe Heisel

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte
bibliografische Daten sind im Internet
über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2004

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch
begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des
Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wieder-
gabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der
Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch
bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2005

ISBN 3-8316-0453-3

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089/277791-00 · www.utzverlag.de

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
Inhaltsverzeichnis.....	7
Abkürzungen und Formelzeichen	9
Extended Abstract.....	13
1 Einleitung.....	19
2 Stand des Wissens und der Technik	21
2.1 Bekannte Mikrobohrverfahren	21
2.2 Bisherige Anwendungen und verwendete Techniken beim Laserstrahlbohren	24
2.3 Grundlagen des Laserstrahlbohrens	33
2.3.1 Laserstrahlen als Bohrwerkzeug.....	33
2.3.2 Einflussgrößen auf den Bohrprozess	38
2.3.3 Absorption von Laserstrahlung.....	40
2.3.4 Wechselwirkungsprozesse bei Einwirkung der Laserstrahlung	47
3 Zielstellung und Aufgabe der Arbeit	55
4 Versuchsaufbau.....	57
4.1 Verwendete Versuchsanlagen	57
4.2 Parameterauswahl bei Nanosekundenpulsen.....	69
5 Orientierende Untersuchungen zur Prozessverbesserung und Qualitätssteigerung.....	75

5.1	Ausbildung bestimmter Bohrgeometrien hinsichtlich Konizität, Einzug und Schmelzbildung	75
5.2	Methoden zur Erreichung bestimmter Geometrie	83
5.3	Wendelbohren.....	85
5.4	Wendelbohroptik	88
5.5	Auswirkungen einfallender Strahlen bei schrägem Durchgang durch eine Fokussierlinse	92
5.6	Auslegung der Wendelbohroptik.....	93
5.7	Modellvorstellungen	96
5.8	Einfluss der Pulsdauer	103
6	Untersuchung der Einflussgrößen beim Wendelbohren.....	115
6.1	Einfluss der Werkstoffzusammensetzung.....	115
6.2	Einfluss der Materialstärke	117
6.3	Einfluss der Pulsenergie	120
6.4	Einfluss des Wendeldurchmessers.....	123
6.5	Polarisationseinfluss beim Wendelbohren.....	126
6.6	Einfluss der Prozessgase.....	129
6.7	Einfluss der Wellenlänge auf den Volumenabtrag	133
6.8	Qualität und Präzision beim Wendelbohren.....	142
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	149
	Anhang.....	153
	Literatur	155

1 Einleitung

Die Lasermaterialbearbeitung hat in der industriellen Fertigung einen festen Platz erhalten. Dennoch gibt es immer noch einige Anwendungsgebiete des Lasers, die bisher in der metallverarbeitenden Industrie vernachlässigt werden. Dazu zählt unter anderen auch das Laserstrahlbohren. Laserstrahlbohren war die erste Anwendung in der Materialbearbeitung [1]. Sehr früh wurden mit dem Rubin-Laser Lagersteine aus Saphir für die Uhrenindustrie gebohrt [2, 3, 4] und Diamantziehsteine für die Drahtindustrie hergestellt [5, 6, 7], die eine besondere Trichterform aufweisen müssen, welche mit dem Laser gut erzeugt werden kann. Das Bohren von Metallen war lange Zeit nicht in Betracht gezogen worden, da entweder die Herstellung solcher Bohrungen mit dem Laser unwirtschaftlich war oder sie nicht in der benötigten Qualität erzeugt werden konnten. Das Einbringen von Kühlbohrungen in Turbinenschaufeln [8, 9, 10] blieb für einige Zeit die einzige Anwendung in Metall, da diese Bohrungen keine hohen Genauigkeiten bezüglich des Durchmessers aufweisen müssen. Die wichtigste Anforderung ist die vollständige Durchbohrung mit einem Mindestdurchmesser, weshalb es erforderlich ist, bei diesem Herstellungsverfahren jede einzelne Bohrung von Hand auf Durchlässigkeit zu überprüfen. Das Laserstrahlbohren ist neuerdings ein attraktives Verfahren zur kostengünstigen Herstellung von Sieblöchern, Drossel-, Zerstäubungsbohrungen etc., welche ähnlich den Kühlbohrungen keine großen Anforderungen an die Genauigkeiten erfordern. Wesentliche Vorteile des Laserstrahlbohrens sind die Möglichkeit zur flexiblen Lochanordnung, das Potential zur Minimierung der Lochquerschnitte und das im Vergleich zum Erodierverfahren schnelle Einbringen der Löcher [11].

Neben der hohen Effizienz des Laserbohrprozesses gewinnt der Aspekt der Herstellbarkeit kleinerer Löcher als es mit konventionellen mechanischen und elektroerosiven Verfahren möglich ist an Bedeutung. Es werden allerdings sehr hohe Anforderungen an die Bohrungsgeometrie und die Reproduzierbarkeit gestellt. Die bisher an konkreten Bauteilen mit den bekannten Verfahrenstechniken durchgeführten Laserbohrversuche konnten die gestellten Anforderungen nicht erfüllen.

In der vorliegenden Arbeit soll ein neues Verfahren dargestellt werden, mit welchem die geforderten Eigenschaften der Bohrungen hinsichtlich Genauigkeit und Reproduzierbarkeit erfüllt werden können. Die Technik zielt auf ein bislang noch nicht erreichtes Bearbeitungsfeld unterhalb der Durchmesser von $120\ \mu\text{m}$ ab, welches bisher nicht mit konventionellen Verfahren kostengünstig dargestellt werden konnte. Die Umsetzung der neuen Technik in der industriellen Fertigung ist mit den zu erwartenden Kosten pro Bohrung gekoppelt. Dies hängt sehr stark von der weiteren Entwicklung der Laserstrahlquellen und den zu erwartenden Kosten für die neuartigen diodengepumpten Kurzpulslaser ab.

Nach der Einleitung folgen in Kapitel 2 die Darstellung vom Stand der Technik bekannter Mikrobohrverfahren bisheriger Anwendungen sowie die Grundlagen zum Laserstrahlbohren bezüglich der Einflussgrößen und der Wechselwirkungsprozesse zwischen Laserstrahlung und Werkstück. Die Zielstellung der Arbeit wird in Kapitel 3 dargelegt. Kapitel 4 beschreibt den Versuchsaufbau mit den verwendeten Lasern sowie die speziellen Optiken und die Parameterauswahl bei den Versuchen. Danach folgen orientierende Untersuchungen zur Prozessverbesserung und Qualitätssteigerung in Kapitel 5. Darin wird auch das neue Verfahren des Wendelbohrens vorgestellt. Ein Vergleich der neuen Wendelbohrtechnik mit den herkömmlichen Laserbohrverfahren hebt die Vorteile des neuen Verfahrens hervor. Anschließend werden in Kapitel 6 die parametrischen Einflussgrößen beim Wendelbohren erörtert. Ferner werden unterschiedliche Werkstoffe und die Auswirkungen bei unterschiedlichen Werkstoffdicken untersucht. Nachfolgend wird der Einfluss unterschiedlicher Prozessgase dargestellt sowie der Einfluss der Wellenlängen mittels Bohrfortschrittsuntersuchungen beleuchtet und Kriterien zur Auswahl der optimalen Wellenlänge für die Bearbeitung erörtert. Abschließend wird die erreichbare Qualität von Wendelbohrungen aufgezeigt.