

Prozesssicherungsmaßnahmen beim Bohren metallischer Werkstoffe mittels Laserstrahlung

Von Dr.-Ing. Michael Honer
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · München

D93

Als Dissertation genehmigt von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Friedrich Dausinger
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Heinz Kück

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 2004

ISBN 3-8316-0441-X

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089/277791-00 – Fax: 089/277791-0

Inhalt

Kurzfassung	5
Inhalt	7
Symbole und Einheiten	9
Extended Abstract	13
1 Einleitung	17
1.1 Motivation	17
1.2 Zielsetzung	18
1.3 Aufbau der Arbeit	18
2 Grundlagen und Stand der Technik	21
2.1 Charakterisierung von Bohrungen	22
2.2 Laserbohren	24
2.2.1 Laserstrahlparameter	25
2.2.2 Bohrverfahren	31
2.2.3 Hirscheegg-Modell	35
2.2.4 Relevanz und Toleranzen der Prozessparameter	37
2.3 Prozessdiagnostik	44
2.3.1 Akustische Emissionen beim Laserbohren	44
2.3.2 Beobachten des Bohrprozesses mit optischen Sensoren	45
2.3.3 Überwachung des Lasersystems	47
2.3.4 Ermittlung der Fokusposition über den Strahlengang	48
3 Experimenteller Aufbau	50
3.1 Optischer Aufbau	50
3.2 Sensoren	53
3.3 Kamera	53
3.4 Strahlanalyse-System	54
3.5 Messtechnik und Datenauswertung	56
3.6 Maschinensteuerung	57

3.7	Charakterisierung der verwendeten Strahlquelle	57
3.7.1	Laserleistung	57
3.7.2	Pulsdauer	59
3.7.3	Messen der Strahlqualität	59
3.8	Prozessparameter	61
4	Lösungsansätze und experimentelle Umsetzung	63
4.1	Strahlvermessung zur Qualitätssicherung	63
4.2	Sicherstellen der Fokusslage	66
4.2.1	Ursachen für Änderungen der Fokusslage	66
4.2.2	Sicherstellen der Fokusslage durch externe Sensoren	68
4.2.3	Bauteile mit ebener Oberfläche	69
4.2.4	Abstandsregelung an Bauteilen mit gekrümmter Oberfläche mit intelligenter Kamera	75
4.3	Durchbrucherkennung beim Wendelbohren	81
4.3.1	Bestimmung einer geeigneten Messgröße	82
4.3.2	Funktionsprinzip der Durchbrucherkennung	84
4.3.3	Vorteile der Abschaltautomatik	85
4.4	Weitere Aussagen aus Höhe und Verlauf des Plasmasignals	87
4.4.1	Erkennen von Leistungsschwankungen anhand des Signalver- laufs im Plasmasignal	89
4.4.2	Aussage über die Fokusslage	91
4.4.3	Rückschlüsse auf den Gasdruck	93
4.4.4	Korrelation des Abstands zwischen Werkstück und Gasdüse zum Plasmasignal	94
4.4.5	Detektion von Abweichungen des Wendeldurchmessers	97
4.4.6	Zusammenfassende Beurteilung der Aussagen des Plasmaleuch- tens	100
5	Zusammenfassung	101
	Abbildungsverzeichnis	103
	Tabellenverzeichnis	105
	Literatur- und Quellenverzeichnis	106

1 Einleitung

1.1 Motivation

Das Laserbohren ist neben dem Laserschweißen und dem Laserschneiden eines der führenden Laserverfahren für die Materialbearbeitung. Insbesondere im Fahrzeugbau dient es als attraktives Verfahren zur kostengünstigen Herstellung von Sieblöchern, Drossel- und Zerstäubungsbohrungen [1]. Dabei werden unterschiedliche Anforderungen an die Bohrungsgeometrie und -qualität gestellt.

Bei der Herstellung von Einspritzdüsen sind diese Anforderungen extrem hoch, da die hierfür erzeugten Durchgangslöcher nicht nur den Durchfluss, sondern auch das Sprühbild eines Fluids bestimmen. So wird bei einem Nenndurchmesser von kleiner als $120\ \mu\text{m}$ eine Durchmessertoleranz von wenigen Mikrometern verlangt und die Vorgaben für Kantenverrundung und Zylindrizität liegen ebenfalls im Prozentbereich. Bohrungen zwischen $120\ \mu\text{m}$ und $1\ \text{mm}$ können sehr wirtschaftlich mittels Senkerodieren hergestellt werden. Dieses Verfahren stößt jedoch bei kleineren Durchmessern an seine Grenzen, da die hierfür notwendigen dünnen Drähte für Bohrungen mit einem großen Verhältnis von Tiefe zu Durchmesser nicht mehr handhabbar sind.

Für die hohen Anforderungen an die Bohrung wurde im Laufe der letzten Jahre ein neues Laserbohrverfahren, das Wendelbohren, entwickelt [2, 3]. Mit diesem Verfahren können hoch präzise Bohrungen erstellt werden. Die erreichbaren Abweichungen liegen für Bohrungen in metallischen Werkstoffen bei $\pm 3\ \mu\text{m}$ beim Bohrungsdurchmesser und $\pm 1\ \mu\text{m}$ in der Form der Bohrungen [3]. Jedoch hängt die Bohrungsgeometrie dabei von einer Vielzahl von Prozessparametern ab [4].

Zur Einführung dieses Verfahrens in die Mengenfertigung kommen zu den genannten Anforderungen auch entsprechend hohe Ansprüche hinsichtlich der Reproduzierbarkeit hinzu. Ziel dieser Arbeit ist das Erarbeiten von Verfahrens- und Systemkomponenten zur wiederholgenauen Herstellung von Mikrolöchern mit Durchmessern kleiner als $120\ \mu\text{m}$ in der industriellen Fertigung. Mit Hilfe dieser Komponenten sollen Prozessparameter laufend gemessen werden um Schwankungen auszugleichen, die sich unter anderem aus fertigungsbedingten Toleranzen von Werkstück und Werkstückpositionierung erge-

ben. Nur mit wirksamen Regelmechanismen wird es möglich sein, die Kenngrößen der Durchgangsbohrungen auch in der Mengenfertigung im Bereich der Toleranz zu halten.

1.2 Zielsetzung

Für das Präzisionsbohren metallischer Werkstoffe mit Laserstrahlen gibt es keine Standardmaschinen. Ebenso sind keine Methoden zur Prozesssicherung etabliert. So greift man zur Sicherung der Fokuslage, also des Abstands des Laserfokus von der Oberfläche des Werkstücks, im Laborbetrieb auf manuelles Messen, beispielsweise mit Fühlerlehre oder Endmaß, zurück. Im Rahmen dieser Arbeit sollte ein Verfahren entwickelt werden, mit dem sich die Position des Werkstücks vollautomatisch nachregeln lässt, um Änderungen der Lochgeometrie, welche durch Schwankungen der Fokuslage hervorgerufen werden, innerhalb des geforderten Bereichs zu halten.

In der Massenproduktion hergestellte Bauteile sind stets mit Toleranzen behaftet. Die sich hiermit ergebenden Schwankungen der zu durchbohrenden Wandstärke sowie die Leistungsschwankungen der verfügbaren Lasersysteme resultieren in unterschiedlichen Zeiten zum Durchbrechen des Werkstücks. Um sicherzustellen, dass sämtliche Bohrungen das Material durchbrechen, kann die Bohrzeit so lang gewählt werden, dass auch die größte, innerhalb der Toleranz liegende Wandstärke noch durchbohrt wird. Damit wird jedoch bei allen dünneren Teilen nach dem Durchbruch weitere Energie in die Wandung der Bohrung sowie in den Rückraum der Bohrung eingebracht. Bei Bauteilen, bei denen der Laserstrahl hinter der einzubringenden Bohrung auf eine andere Oberfläche trifft, ergibt sich somit eine Schädigung dieser Fläche, in jedem Fall aber ein weiteres Anschmelzen der Bohrlochwandung. Um diesem Problem zu begegnen, ist der Zeitpunkt zu ermitteln, in dem die Bohrung das Bauteil vollständig durchdrungen hat. Daraufhin soll durch geeignete Steuerungstechnik der Laser abgeschaltet werden, um die Bearbeitungsmaschine ohne Zeitverlust weitertakten zu können.

Mit Hilfe der zu erarbeitenden Verfahrens- und Systemkomponenten ist der Prozess dergestalt zu optimieren, dass er stabil genug ist, um in der Mengenfertigung eingesetzt zu werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Grundlagen des Laserbohrens werden in Kapitel 2 behandelt. Dabei geht es zum Einen um die Charakterisierung des Bohrloches mittels geometrischer Kenngrößen. Die-

se sind zum Teil von Makrobohrungen bekannt. Darüber hinaus gibt es Kenngrößen, die erst im Verlauf der Prozessentwicklung eingeführt wurden, wie beispielsweise die Maße eines Turms, der sich beim Laserbohren auf der Eintrittsseite des Laserstrahls bilden kann (S. 24).

Im Anschluss wird das Laserbohren näher erläutert. Dazu werden in Abschnitt 2.2.1 zunächst die Größen aufgeführt, mit welchen die Eigenschaften von Laserstrahlen und die Strahlformung charakterisiert werden. Einerseits dienen diese Laserstrahlparameter zum Vergleich unterschiedlicher Lasersysteme, andererseits gehen sie auch in die Beschreibung der Wechselwirkung von Laserstrahl und Materie ein.

Für das Bohren mittels Laserstrahlen werden in Abschnitt 2.2.2 die derzeit verwendeten Verfahrensvarianten erläutert und die wesentlichen Unterschiede kurz aufgezeigt. Im Anschluss wird ein qualitatives Prozessmodell, das so genannte „Hirscheegg-Modell“, vorgestellt (Abschnitt 2.2.3). Dieses teilt das Bohren in vier unterschiedliche Phasen auf, vom ersten Auftreffen der Laserstrahlen auf die Oberfläche bis zum vollständigen Durchbohren des Werkstücks, beziehungsweise bis zum Ende des Bohrfortschritts, welches bei zu geringer Pulsenergie beobachtet wird.

Anschließend werden in Abschnitt 2.2.4 die relevanten Prozessparameter aufgeführt, welche für die Reproduzierbarkeit der Bohrungen ausschlaggebend sind. Soweit sinnvoll, werden die Grenzen angegeben, die für die Parameter beim Präzisionsbohren einzuhalten sind. Das Kapitel schließt in Abschnitt 2.3 mit einer Übersicht über die bekannten Verfahren, mit denen Bohrprozesse diagnostiziert werden. Zum Teil werden mit den aufgeführten Methoden auch Prozessparameter überwacht.

Kapitel 3 befasst sich mit dem experimentellen Aufbau. Der optische Aufbau von der Strahlquelle über Strahlführungs- und -formungselemente, der für die Herstellung von Präzisionsbohrungen erstellt wurde [3], wird in Abschnitt 3.1 erläutert. In den folgenden Abschnitten 3.2–3.4 werden die Systemkomponenten aufgeführt, mit denen die relevanten Messwerte erfasst werden. Mit der in Abschnitt 3.5 erläuterten Messtechnik und Datenauswertung werden diese Messwerte verarbeitet und zur Prozessüberwachung und -regelung genutzt. Den Abschluss des Kapitels bildet in Abschnitt 3.7 die Charakterisierung der Strahlquelle, die für den Großteil der im Rahmen dieser Arbeit analysierten Prozesse genutzt wurde.

Kapitel 4 behandelt die entwickelten Messverfahren sowie die hiermit erreichten Ergebnisse. Mängel am Bohrwerkzeug werden in Abschnitt 4.1 behandelt, welches die Fehlerentdeckung mit Hilfe der Strahlanalyse beschreibt. Nachfolgend geht es in Abschnitt 4.2 um die Maßnahmen zur Regelung der Fokusslage, welche ein wesentliches

Element der Prozesssicherung sind. Dabei werden in Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie unterschiedliche Lösungswege aufgezeigt. In Abschnitt 4.3 wird ein Verfahren zur Bestimmung der Durchbruchzeit beschrieben. Mit dem gezeigten Verfahren wird nach Erreichen des Durchbruchs der Laserstrahl abgeschaltet und somit der Bohrprozess beendet. Im folgenden Abschnitt 4.4 wird ergänzend gezeigt, wie sich weitere Prozessparameter auf das verwendete Messsignal auswirken und die Möglichkeiten zur Überwachung dieser Parameter werden diskutiert.

Die Ergebnisse der Arbeit werden in Kapitel 5 zusammengefasst. Darüber hinaus wird mit einem Ausblick auf die aktuellen Entwicklungstendenzen beim Laserbohren auch die Übertragbarkeit der Prozesssicherungskonzepte auf neue Laserbohrverfahren diskutiert.