

Modellierung des Perkussionsbohrens von Metallen mit kurz- und ultrakurz- gepulsten Lasern

Von Dr.-Ing. Andreas Ruf
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.-Ing. Hans Hasse

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 3-8316-0372-3

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089/277791-00 – Fax: 089/277791-01

Inhalt

Kurzfassung	5
Inhalt	7
Liste der verwendeten Symbole	9
Extended Abstract	15
1 Einleitung	19
1.1 Motivation und Ziel der Arbeit	19
1.2 Kurzbeschreibung des Bohrprozesses	22
1.3 Modellierung des Bohrprozesses	26
1.4 Konzeption der Arbeit	29
2 Materialeigenschaften bei hohen Temperaturen	31
2.1 Thermophysikalische Eigenschaften	32
2.2 Transporteigenschaften	34
2.3 Optische Eigenschaften	37
2.4 Phasenübergänge und Verdampfung	41
3 Wechselwirkung der Laserstrahlung mit Materie	45
3.1 Strahlausbreitung in einem homogenen Medium	45
3.2 Energieeinkopplung in der Bohrkapillare	48
3.3 Streuung und Absorption im Materialdampf	54
4 Materialerwärmung und -abkühlung	59
4.1 Klassische Wärmeleitung	60
4.2 Zwei-Temperatur-Modell	64
4.3 Geometrische Einflüsse	67
4.3.1 Strahlprofil und -bewegung	67
4.3.2 Oberflächenrundung	69

5	Materialabtrag durch Verdampfung	71
5.1	Makroskopisches Verdampfungsmodell	71
5.1.1	Makroskopische Abdampftrate	71
5.1.2	Modellbeschreibung und analytische Näherungen	73
5.2	Einflussfaktoren für die Abtrageffizienz	76
5.2.1	Intensität und Pulsdauer	76
5.2.2	Pulszahl	81
5.2.3	Abtragsmechanismus	84
6	Materialaustrieb	87
6.1	Schmelzdynamik	87
6.1.1	Stationärer Schmelzfluss	88
6.1.2	Schmelzbeschleunigung	91
6.1.3	Geometrische Einflüsse	94
6.2	Einfluss der Gasdynamik und des Plasmas	99
7	Zusammenfassung und Ausblick	109
A	Materialdaten ausgewählter Werkstoffe	112
B	Physikalische Grundlagen der Zustandsgleichung	113
B.1	Grundlagen des QEOS-Modells	113
B.1.1	Elektronischer Anteil	113
B.1.2	Beitrag der Ionen	114
B.1.3	Bindungskorrektur	115
B.2	Ionisierung des Dampfes nach dem Saha-Modell	115
B.3	Berechnung der Stoßfrequenzen in einem teilweise ionisierten Plasma	117
C	Numerische Simulation der Strahlpropagation	119
D	Erwärmung eines sphärischen Hohlraums	122
	Literatur- und Quellenverzeichnis	124

1 Einleitung

1.1 Motivation und Ziel der Arbeit

Der Laser hat sich in vielen Bereichen der industriellen Fertigung und der Medizintechnik als flexibles Werkzeug bewährt. Das Marktvolumen von Lasermaterialbearbeitungssystemen ist daher in den vergangenen Jahren kontinuierlich auf derzeit über vier Milliarden Euro angestiegen und eine weitere Steigerung auf das Dreifache dieses Betrages wird für die nächsten zehn Jahre prognostiziert [29]. Gegenüber herkömmlichen Verfahren bietet der Laser neue Möglichkeiten hinsichtlich Präzision, Effizienz und Vielseitigkeit. Dennoch stehen diesen Vorteilen häufig entscheidende Kostennachteile durch die vergleichsweise hohen Anschaffungs- und Wartungskosten gegenüber. Um diese zu kompensieren müssen an den Laserfertigungsprozess besonders hohe Qualitäts- und Produktivitätsanforderungen gestellt werden.

In der Mikrobearbeitung, also z. B. beim Präzisionsbohren und -schneiden oder dem Strukturieren von Oberflächen, konkurriert der Laser vor allem mit mechanischen und elektrochemischen Verfahren. Durch das Feinschneiden, das Stechen oder das mechanische Wendelbohren auf der einen Seite und die Funkenerosion oder das Elektronenstrahlbohren auf der anderen lassen sich prinzipiell ebenfalls Bohrungen mit kleinen Abmessungen und hoher Präzision darstellen. Der Laser bietet jedoch gegenüber solchen Methoden zahlreiche entscheidende Vorteile, die in den letzten Jahren zu einem stetigen Anstieg seiner industriellen Bedeutung in der Fertigungstechnik geführt haben.

Da es sich beim Laserbohren und -abtragen um ein berührungsloses Verfahren handelt, bietet es eine hohe Flexibilität bei der Auswahl der Materialien, der Zugänglichkeit der Bearbeitungsstelle und der Kombination verschiedener Fertigungsschritte. Im Gegensatz zu mechanischen Methoden können durch den Einsatz des Lasers auch spröde und harte Materialien wie Keramiken, Diamant oder faserverstärkte Verbundwerkstoffe ohne Werkzeugverschleiß bearbeitet werden. Da diese elektrisch nicht leitfähig sind, sind elektrochemische Verfahren hierfür nicht geeignet. Solche Werkstoffe gewinnen aber beispielsweise durch ihre Hitzebeständigkeit, ihr vergleichsweise geringes Gewicht sowie ihre Härte, Festigkeit und chemische Beständigkeit immer mehr an industrieller und medizintechnischer Bedeutung. Der Laser ermöglicht dabei entweder ihre direkte Be-

arbeitung oder, wie beim laserunterstützten Zerspanen, durch eine geeignete Vorerwärmung der Abtragsstelle eine Reduktion des Werkzeugverschleißes mechanischer Verfahren [30]. Beispiele für den erfolgreichen Einsatz des Lasers bei solchen Aufgabenstellungen sind die Herstellung keramischer Spinddusen sowie von Motor- oder Turbinenkomponenten [1–3, 26]. Außerdem wurde das Schneiden und Polieren von Diamant im Werkzeugbau demonstriert [4].

Aber auch bei der Mikrobearbeitung von Metallen kann der Laser die herkömmlichen Fertigungsverfahren im Hinblick auf Produktivität und Qualität übertreffen. Im Flugzeugbau ermöglicht der Laser z. B. durch das schnelle Einbringen von mehreren Millionen kleinster Löcher in Leitbleche eine Absaugung der Verwirbelungen an der Oberfläche und damit eine Reduktion des Luftwiderstands bzw. des Treibstoffverbrauchs [3]. Mit einer ähnlich hohen Effizienz werden inzwischen auch Kraftstofffilter in Düsen spannschrauben großindustriell hergestellt [5]. In zahlreichen anderen Anwendungen steht die durch den Lasereinsatz erhöhte Formtreue und Reproduzierbarkeit im Vordergrund. Die Kombination aus Bohren und Abtragen ermöglicht dabei auch die Erzeugung von Formbohrungen wie z. B. im Fall von Kühlbohrungen in Turbinenschaukeln [3]. Auch bei der Herstellung von Einspritzdüsen für Motoren verspricht der Laser eine Miniaturisierung und Steigerung der Präzision gegenüber der Funkenerosion bei gleichzeitig hoher Effizienz [5–7]. In ähnlicher Weise lassen sich auch Oberflächen mikroskopisch strukturieren um z. B. die tribologischen Eigenschaften zu verbessern. Das Laserhonen von Zylinderlaufbahnen wird inzwischen in der industriellen Serienproduktion eingesetzt [8]. In der Drucktechnik ist die hohe Genauigkeit des Lasers zum Strukturieren von Druckklischees und zur Gravur von Walzen von Vorteil [9, 10].

Neben den erwähnten Beispielen gibt noch zahlreiche weitere Anwendungsmöglichkeiten der Lasermikrobearbeitung beispielsweise in der Mikroelektronik, der Herstellung von Düsenplatten in Tintenstrahldruckern oder der Medizin [11–17]. Entscheidend für den wirtschaftlichen Einsatz des Lasers ist in allen diesen Fällen eine auf die jeweiligen Anforderungen des Produktes abgestimmte Bearbeitungsstrategie. Beim Laserbohren muss dabei zunächst ein guter Kompromiss zwischen Produktivität und Qualität gefunden werden. Diese beiden Grundanforderungen stehen sich oft gegensätzlich gegenüber, da zur Qualitätssteigerung meist die Abtragsgeschwindigkeit reduziert werden muss. Wie in Bild 1.1 schematisch dargestellt wird, können dabei verschiedene Verfahren zum Einsatz kommen. Normalerweise werden beim Laserbohren gepulste Laserquellen eingesetzt, um durch die entsprechende Pulsüberhöhung die notwendigen hohen Leistungsdichten von über 10^7 W/cm^2 zu erzeugen. Beim Einzelpulsbohren ist die Pulsdauer so lang, dass innerhalb eines Pulses Materialstärken von einigen Millimetern Dicke durchdrungen werden können. Oft werden hierzu mit Blitzlampen gepumpte Festkörperlaser

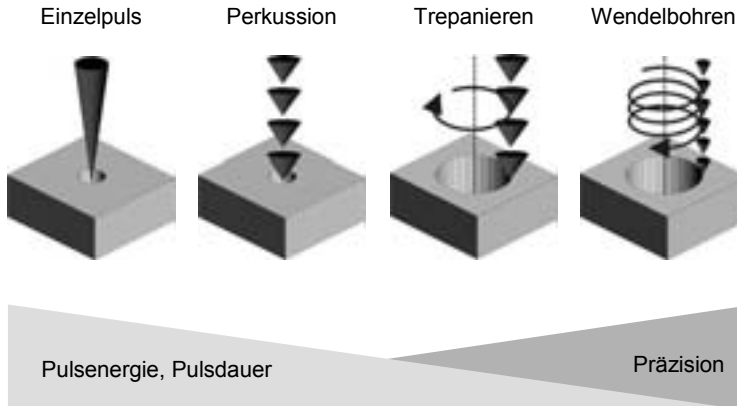


Bild 1.1: Übersicht über die wichtigsten Laserbohrverfahren. Durch die Reduzierung der Pulsdauer und des Abtragsvolumens pro Puls kann bei den repetierenden Verfahren eine höhere Präzision erreicht werden. Die Strahlbewegung führt zu einer weiteren Verbesserung der Formtreue und des Materialaustriebs. Ref. [31]

verwendet, die Pulsdauern in Bereich von $10\ \mu\text{s}$ – $1\ \text{ms}$ (lange Pulsdauern) erzeugen. Bei diesem Verfahren wird jedoch vor allem bei Metallen ein hoher Anteil des Materials in Form von Schmelze ausgetrieben, was meist zu qualitätsmindernden Rückständen an den Bohrungswänden und der Oberfläche führt. Eine Qualitätssteigerung kann durch die Verkürzung der Pulsdauer und damit der Schmelze erzeugenden Einwirkdauer erreicht werden. Dabei sinkt jedoch gleichzeitig das Abtragsvolumen je Laserpuls, so dass beim Perkussionsbohren mehrere Pulse auf die selbe Stelle gerichtet werden müssen. Typischerweise kommen hier bislang durch Güteschaltung gepulste Festkörperlaser (z. B. Nd:YAG) oder beim flächigeren Abtragen auch Excimer-Laser mit Pulsdauern im Bereich von $1\ \text{ns}$ – $1\ \mu\text{s}$ (kurze Pulsdauern) und Repetitionsraten bis zu einigen Kilohertz zum Einsatz. Um statistische Geometrieschwankungen des thermischen Abtragsprozesses ausgleichen und somit eine höhere Formtreue der Bohrungen erreichen zu können, wird beim Trepanieren und Wendelbohren ein stärker fokussierter Laserstrahl auf einer Kreisbahn geführt. Beim Trepanieren wird dabei zunächst zur Verbesserung des Materialaustriebs eine kleine Durchgangsbohrung erzeugt und anschließend das Loch in einem Umlauf ausgeschnitten. Auf diese Weise entstehen häufig deutlich sichtbare Einstichspuren, die beim Wendelbohren dadurch vermieden werden, dass sich die Abtragsfront kontinuierlich, über mehrere Laserumläufe hinweg, in die Tiefe bewegt.

Die Reduzierung der Pulsdauern auf Werte unter $10\ \text{ps}$ (ultrakurze Pulsdauern) in Verbindung mit hohen Repetitionsraten von über $10\ \text{kHz}$ verspricht eine weitere Steigerung

der Qualität bei gleichzeitig hoher Wirtschaftlichkeit, so dass das Bohren mit solchen ultrakurzen Laserpulsen in zunehmendem Maß Gegenstand der aktuellen Forschung ist [18, 19, 32–34]. Dabei sind sowohl die Entwicklung industriell tauglicher Laser als auch einer geeigneten Fertigungsstrategie gefragt. Infolge der höheren Leistungsdichten solcher Laser steigen jedoch die Prozesstemperaturen und damit die Dynamik und die Anzahl der physikalisch relevanten Teilprozesse. Die Optimierung des Bohrergebnisses erfordert daher die Berücksichtigung einer Vielzahl von Einflussgrößen, so dass sie durch ein grundlegendes Prozessverständnis erheblich erleichtert werden kann. Letzteres kann aber, vor allem wegen der kurzen Zeitskalen und geringen räumlichen Abmessungen, nur in begrenztem Umfang experimentell gewonnen werden.

Der Modellierung und Simulation kommt aus diesem Grund in verstärktem Maß die Aufgabe zu, Einblicke in die experimentell nicht oder nur schwer zugänglichen Abläufe zu geben. Die gegenüber den Vorgängen beim Abtragen mit längeren Laserpulsen in ihrer Bedeutung stark veränderten physikalischen Einflussfaktoren erfordern eine spezielle Modellbildung für kurze und insbesondere ultrakurze Pulse. Ähnlich wie der experimentelle Prozess selbst befindet sich auch die Modellierung solcher Bohrungen derzeit in einem Forschungsstadium. Besonders schwierig gestalten sich hierbei die Einbeziehung der hochdynamischen gegenseitigen Wechselwirkung der einzelnen Vorgänge im Festkörper, der Schmelze sowie im Dampf bzw. Plasma. Diese Arbeit soll, ausgehend von Erkenntnissen über den Ablauf und die Bedeutung der Einflussfaktoren, Wege für eine ganzheitliche theoretische Beschreibung aufzeigen. Aufgrund der unter diesen extremen Bearbeitungsbedingungen experimentell nur unzureichend bekannten Materialeigenschaften steht dabei nicht die genaue quantitative Nachbildung des Prozesses sondern eine qualitative Modellierung der wesentlichen Grundzüge im Vordergrund. Diese kann dann als Grundlage für eine gezieltere Auswahl der vielen experimentellen Prozessparameter und somit letztendlich zur Entwicklung einer hinsichtlich Qualität und Produktivität verbesserten Bohrstrategie dienen.

1.2 Kurzbeschreibung des Bohrprozesses

Das Laserbohren von Metallen ist in erster Linie ein thermischer Fertigungsprozess und ist, wie in Bild 1.2 und Bild 1.3 dargestellt, durch eine Vielzahl in kürzester Zeit ablaufender physikalischer Vorgänge gekennzeichnet. Die Laserstrahlung wird dabei zunächst vom Werkstoff absorbiert, der sich daraufhin erwärmt, aufschmilzt und schließlich verdampft. Insbesondere bei kurzgepulsten Strahlquellen entstehen dabei kurzzeitig extrem hohe Oberflächentemperaturen von einigen tausend Kelvin. Die energiereichen Atome