

Herstellung von Präzisionsdurchbrüchen in keramischen Werkstoffen mittels repetierender Laserbearbeitung

Von Dr.-Ing. Joachim Radtke
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. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Engelbert Westkämper

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.

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 2003

ISBN 3-8316-0285-9

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

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

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
Inhaltsverzeichnis	7
Verzeichnis der Symbole und Abkürzungen	11
Extended Abstract	15
1 Einleitung	19
1.1 Ausgangssituation	19
1.2 Problemstellung und Zielsetzung	20
1.3 Gliederung der Arbeit	21
2 Einführung in die Präzisionsbearbeitung keramischer Werkstoffe	23
2.1 Definition und Einteilung	23
2.2 Herstellung und Eigenschaften technischer Keramik	25
2.3 Verfahren zur Erzeugung von Durchbrüchen in keramischen Bauteilen	27
2.3.1 Bearbeitung vor dem abschließenden Sinterprozess	28
2.3.2 Hart- oder Endbearbeitung.	29
2.4 Präzises Laserbohren keramischer Werkstoffe	31
2.4.1 Verfahrensvarianten beim Laserbohren.	31
2.4.2 Präzisionsbearbeitung mit Gaslasern	34
2.4.3 Präzisionsbearbeitung mit Festkörperlasern	35
3 Wechselwirkung von Laserstrahlung und Materie	38
3.1 Grundlegende Beziehungen zur Ausbreitung von Strahlung in Medien.	38
3.2 Optische Eigenschaften technischer Keramik.	41
3.2.1 Reine keramische Werkstoffe	41
3.2.2 Technische Keramik bei Raumtemperatur.	43
3.2.3 Technische Keramik bei prozessrelevanten Temperaturen	44
3.3 Einfluss der optischen Eigenschaften auf Erwärmung und Abtrag.	45
3.4 Wechselwirkung mit laserinduzierten Plasmen.	48
3.4.1 Absorption von Strahlung	49

3.4.2	Laserinduzierte Stoßwellen	51
3.4.3	Beeinflussung der Strahlpropagation	52
3.4.4	Plasmatransmission und -absorption beim Laserbohren	52
4	Systemtechnische Aspekte	57
4.1	Eingesetzte Strahlquellen	57
4.1.1	Das lampengepumpte System	58
4.1.2	Die diodengepumpte Systeme	59
4.1.3	Leistungsdaten	60
4.2	Strahlführung und -formung	61
4.3	Erzeugung der Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Werkstück.	64
4.3.1	Bewegung des Werkstücks	64
4.3.2	Bewegung des Laserstrahls	65
5	Grundlegende experimentelle Untersuchungen des Bohrprozesses	67
5.1	Beginn des Bohrprozesses	68
5.2	Prozessverlauf bei größerer Bohrtiefe	75
5.2.1	Phase des konstanten Bohrfortschritts	77
5.2.2	Stopp des Bohrfortschritts	79
5.3	Weitere Einflussgrößen auf Bohrprozess und Bohrlochgeometrie	82
5.3.1	Energiedichte	82
5.3.2	Wendeldurchmesser	84
5.3.3	Wellenlänge	86
5.3.4	Pulsdauer	88
6	Modellansatz zum Bohren mit Kurzpuls-Festkörperlasern	90
6.1	Absorption keramischer Werkstoffe	90
6.2	Phasen der Bohrlochausbildung	91
6.2.1	Phase I: Planare Ablation	93
6.2.2	Phase II: Ausbildung der Bohrkapillare	93
6.2.3	Phase III: Phase konstanter Bohrrate	97
6.2.4	Phase IV: Instabiler Prozess und Bohrstopp	100
6.3	Gültigkeitsbereich der Modellvorstellung	101

7	Fertigungstechnische Aspekte beim Wendelbohren	103
7.1	Einfluss der Pulsdauer auf redeponierte Schichten	103
7.2	Möglichkeiten zur Beeinflussung der Bohrlochgeometrie	106
7.2.1	Energiedichte	106
7.2.2	Fokuslage	107
7.2.3	Bohrdauer	109
7.2.4	Anstellwinkel	110
7.3	Anwendungsbeispiele und technologische Bewertung	112
8	Untersuchungen zum Laser-Erodieren	116
8.1	Verfahrensbedingte Vorteile des Laser-Erodierens	117
8.1.1	Prozessqualität	117
8.1.2	Prozesseffizienz	119
8.2	Einfluss von Wellenlänge und Prozessgas auf die Bearbeitung	120
8.2.1	Prozesseffizienz	121
8.2.2	Prozessqualität	123
8.3	Anwendungsbeispiele und technologische Bewertung	126
9	Zusammenfassung	129
10	Anhang	133
	Literaturverzeichnis	138

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Vor nunmehr über vierzig Jahren wurde von Robert Maiman der erste Laser, ein gepulst betriebener Rubinlaser, realisiert. Die Wirkung dieser ersten Lasersysteme auf Material wurde durch die Einheit Gilette charakterisiert. Je höher die Pulsenergie eines Lasers war, desto mehr Rasierklingen konnten mit einem Puls durchbohrt werden. Insofern war das Bohren die erste „fertigungstechnische“ Anwendung des Lasers [1].

In den darauffolgenden Jahren wurden zahlreiche neue Konzepte für gepulste und kontinuierlich betriebene Strahlquellen entwickelt, die dem Strahlwerkzeug Laser in der industriellen Fertigung neue Möglichkeiten eröffneten. Diese beruhen nicht zuletzt auf der außerordentlichen Flexibilität sowohl hinsichtlich der verschiedensten Bearbeitungsverfahren, wie Schneiden, Schweißen, Bohren, Strukturieren, Beschriften oder Härten, die mit dem Laser durchführbar sind als auch bezüglich der zahlreichen Werkstoffe, die mit ihm bearbeitet werden können. Abhängig von der Bearbeitungsaufgabe kann mit den heute wichtigsten drei Laserarten, dem CO₂-, Festkörper- sowie Excimer-Laser, ein breites Spektrum von Laserwellenlängen, Leistungsbereichen, Strahlqualitäten und Pulsdauern eingesetzt werden [2].

Obwohl das Laserbohren, wie eingangs erwähnt, das erste Verfahren der Lasermaterialbearbeitung war, sind nur wenige Beispiele industrieller Umsetzungen bekannt. Etablierte fertigungstechnische Anwendungen, in denen seit Jahren erfolgreich vom Laserbohren Gebrauch gemacht wird, sind beispielsweise das Bohren von Uhrensteinen, das Perforieren von thermisch hochbelasteten Turbinenkomponenten oder das Bohren von Druckköpfen für tintenspritzende Systeme [1-3]. Sowohl gemessen an anderen Laserverfahren, wie dem Schneiden und Schweißen, als auch im Vergleich mit klassischen Alternativverfahren blieb die Zahl der Fertigungseinsätze jedoch weit zurück. Neben den Kosten, die generell die Verbreitung von Laserverfahren behindern, waren im Feld der hochpräzisen Mikromaterialbearbeitung vor allem die unzureichende Präzision und Reproduzierbarkeit Hemmnisse für eine industrielle Umsetzung.

Mitte der neunziger Jahre wurden gepulste Laserstrahlquellen für die Präzisionsbearbeitung immer zuverlässiger und leistungsstärker. Zahlreiche Forschergruppen haben neuartige Strahlquellenkonzepte untersucht und erarbeitet. Insbesondere mittels diodengepumpter Festkörperlaser konnten Laserstrahlparameter, Leistungen und Repetitionsraten erreicht werden, die deutlich breitere Einsatzmöglichkeiten in der industriellen Fertigung versprachen.

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Hochleistungskeramiken haben sich in den letzten Jahren einen weiten Anwendungsbereich erobert. Vom Maschinen- und Anlagenbau über die chemische Industrie bis hin zur Lebensmittelverarbeitung und Medizintechnik werden sie in nahezu allen Bereichen der produzierenden und verarbeitenden Industrie eingesetzt. Aufgrund von Materialeigenschaften wie hoher Härte, chemischer und thermischer Beständigkeit sowie günstigen tribologischen Eigenschaften sind Keramiken häufig metallischen Werkstoffen überlegen.

Den Vorteilen stehen allerdings hohe Kosten bei der Endbearbeitung keramischer Bauteile gegenüber. Insbesondere für die Herstellung von hochpräzisen Durchbrüchen sind konventionelle Bearbeitungsverfahren nur begrenzt geeignet. Allerdings spielen präzise Bohrungen als dosierende, druckaufbauende, formgebende und kühlende Funktionselemente in einer Vielzahl von hoch technisierten Produkten aus unterschiedlichen Branchen eine entscheidende Rolle für deren Leistungsfähigkeit, Effizienz und Umweltfreundlichkeit. Dieses Marktpotential blieb für Keramiken bisher unerschlossen.

Ein wichtiges Anwendungsbeispiel aus der Verkehrstechnik ist die Aufbereitung und Dosierung von Kraftstoffen für Verbrennungsmotoren. Insbesondere in Großmotoren könnten keramische Einspritzdüsen mit mehreren Einspritzstrahlen eine Reduktion von Emission und Treibstoffverbrauch bei gleichzeitig geringem Verschleiß und hohen Standzeiten ermöglichen. Potentielle Anwendungen für Präzisionsbohrungen in Oxidkeramiken werden im Bereich der Spinn- und Wirbeldüsen für die Textilindustrie gesehen. Bei den in diesem Industriezweig etablierten metallischen Düsen tritt durch größere Adhäsionswirkung und fortschreitenden Verschleiß der Abrisskante eine Flusenbildung beim Fadenabzug auf, die durch den Einsatz verschleißfester keramischer Materialien vermeidbar wäre. Zusätzlich kommt es bei der Kunstfaserherstellung mit zunehmender Betriebsdauer zu einem langsamen Verkleben der Düsengeometrie. Diese störenden Anhaftungen müssen durch Ausheizen der Düsenplatte beseitigt werden. Im Vergleich zu metallischen Düsen könnte bei Keramiken die Ausheiztemperatur deutlich gesteigert werden, sodass ein nachfolgender chemischer Reinigungsvorgang entfallen könnte.

Aufgrund der Anforderungen hinsichtlich Strukturtyp, Abmessungen und Genauigkeit, die in Tabelle 1.1 zusammengefasst sind, konnten zur Herstellung von Mikrodüsen bisher nur metallische Werkstoffe eingesetzt werden. Mit der funkenerosiven Bearbeitung steht für diese Werkstoffklasse ein Fertigungsverfahren zur Verfügung, das die Anforderungen weitestgehend erfüllen kann, für keramische Werkstoffe jedoch ungeeignet ist. Mittels den bereits erwähnten vielversprechenden Konzepten für diodengepumpte Kurzpuls-Festkörperlaser galt es nun, die Möglichkeiten für das Präzisionsbohren keramischer Werkstoffe zu evaluieren und die bisher vorhandenen technologischen Hemmnisse zu überwinden, um schließlich durch die Herstellung von Präzisionsdurchbrüchen mittels Laserstrahlung das Anwendungspotential keramischer Düsen zu erschließen.

Geometrie des Durchbruchs	kreissymmetrisch, elliptisch, komplex (z. B. Trilobal, Triple-C)
Strukturabmessungen	< 400 μm (in der Textiltechnik) < 250 μm (im Kfz-Bereich)
Kantenverrundung	< 1 μm
Flankenwinkel	< 1 Grad
Formgenauigkeit	$\pm 1\%$ vom Sollmaß

Tabelle 1.1: Strukturtypen und Anforderungen an Präzisionsdurchbrüche.

Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel der vorliegenden Arbeit, ein besseres Verständnis des Bohrprozesses mit Kurzpuls-Festkörperlasern zu erlangen. Eines der Hauptanliegen wird daher im Folgenden sein, am Beispiel keramischer Werkstoffe der Frage nachzugehen, wie die zugrundeliegenden Wechselwirkungsphänomene zu verstehen sind, um schließlich über ein erweitertes Prozessverständnis die Präzision der Bearbeitung zu verbessern. Auf der Grundlage einer Vielzahl von experimentellen Beobachtungen soll eine Modellvorstellung erarbeitet werden, die sowohl die Energieeinkopplung in semitransparente Keramiken als auch die charakteristischen Vorgänge bei der Ausbildung eines Bohrlochs erklärt. Besonderes Gewicht wird dabei auf die Herstellung von Durchbrüchen mittels repetierender Laserbearbeitung gelegt, wobei die Strukturdimensionen zwischen einigen zehn Mikrometern und einem Millimeter liegen.

1.3 Gliederung der Arbeit

Nach einem kurzen Überblick über Einteilung und Eigenschaften keramischer Werkstoffe werden in Kapitel 2 ausgehend von den klassischen Fertigungsverfahren auch die Möglichkeiten einer Präzisionsbearbeitung mit Lasern aufgezeigt.

Eine unverzichtbare Voraussetzung für die Interpretation und das Verständnis der experimentellen Untersuchungen stellen die in Kapitel 3 beschriebenen Wechselwirkungen von Laserstrahlung und Materie dar. Dabei werden sowohl grundlegende Beziehungen der Strahlausbreitung erläutert als auch das optische Verhalten technischer Keramiken diskutiert. Darauf aufbauend wird ein einfacher theoretischer Ansatz zur Abschätzung von Abtragsraten in keramischen Werkstoffen vorgestellt.

Für die reproduzierbare Herstellung hochpräziser Durchbrüche spielt die eingesetzte Systemtechnik eine entscheidende Rolle. In Kapitel 4 werden daher die verwendeten Strahlquellen, Möglichkeiten der Strahlführung und -formung sowie Konzepte zur Erzeugung einer Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Werkstück dargestellt.

Die in Kapitel 5 beschriebenen grundlegenden experimentellen Untersuchungen sollen über die verschiedenen Phasen während des Bohrvorgangs Aufschluss geben. Der Bohrprozess selbst wird dabei sowohl über die Morphologie des Bearbeitungsergebnisses als auch über Hochgeschwindigkeitsaufnahmen während des Bohrens analysiert. Von großem Interesse ist hierbei der Einfluss verschiedenster Prozessparameter auf die Phasen des Bohrfortschritts. Die experimentellen Befunde bilden letztendlich den Ausgangspunkt für die in Kapitel 6 erarbeitete Modellvorstellung zum Präzisionsbohren mit Kurzpuls-Festkörperlasern.

Die Ausführungen in Kapitel 7 und Kapitel 8 legen ihr Hauptaugenmerk auf fertigungstechnische Aspekte bei der Herstellung von Durchbrüchen mit kreissymmetrischer und komplexer Struktur. Neben verschiedenen Möglichkeiten zur Beeinflussung der Bohrlochgeometrie spielen in diesen Abschnitten Einflussfaktoren auf Prozesseffizienz und -qualität eine entscheidende Rolle. Anhand verschiedener Anwendungsbeispiele wird am Ende des jeweiligen Kapitels das Potential zur Herstellung von Präzisionsdurchbrüchen mittels Laserstrahlung aufgezeigt.

Mit einer Zusammenfassung der gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse findet die Arbeit in Kapitel 9 ihren Abschluss.