

Prozessüberwachung beim Laserbohren von Turbinenschaufeln

Von Dr.-Ing. Thomas Herzinger
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · München

D93

Als Dissertation genehmigt von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr. rer. nat. habil. F. Dausinger
Mitberichter: Prof. Dr. sc. nat. W. Osten

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 3-8316-0443-6

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

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

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
Inhaltsverzeichnis	7
Symbole und Einheiten	11
Extended Abstract	15
1 Einleitung	19
1.1 Motivation	19
1.2 Zielsetzung	20
1.3 Aufbau der Arbeit	20
2 Industrielle Anwendung gepulster Festkörperlaser zum Bohren von Turbinenschaufeln	22
2.1 Verfahrensgrundlagen	24
2.2 Qualitätssicherung beim Laserbohren von Turbinenschaufeln	27
3 Stand der Technik	29
3.1 Qualitätssicherung durch <i>online</i> -Strahldiagnose	29
3.2 Auswertung von Prozessstrahlung zur Qualitätssicherung	31
3.3 Eignung der Systeme für das Laserbohren	33
4 Licht-Materie-Wechselwirkungsprozesse bei der Lasermaterialbearbeitung	35
4.1 Das Prinzip des Lasers und die Eigenschaften der erzeugten Strahlung	36
4.1.1 Ausbreitung Gaußscher Strahlung in Luft	38
4.1.1.1 Die skalare Wellengleichung	38
4.1.1.2 Ausbreitung eines Gaußförmigen Strahls	39
4.1.2 Strahlparameter	41
4.1.3 Charakterisierung realer Laserstrahlung	42
4.2 Optische Eigenschaften von Metallen	42
4.3 Absorption und Dispersion	44
4.3.1 Die Fresnelschen Formeln	45

4.3.2	Die Fresnelschen Formeln für absorbierende Materialien	46
4.3.3	Einfluss des Zustands von Oberflächen	47
4.4	Thermalisierung und Wärmeleitung	49
4.4.1	Energiedissipation und Wärmeleitung	50
4.5	Materialabtrag	53
4.6	Schmelzdynamik nach Pulsende	54
4.7	Ionisation und Luftdurchbruch	58
4.8	Temperatur- oder Wärmestrahlung	59
5	Eigenschaften der Prozessstrahlung und deren Charakterisierung	61
5.1	Übersicht	61
5.2	Charakterisierung von Hochleistungs-Laserstrahlung	63
5.2.1	Ortsaufgelöste Vermessung gepulster Laserstrahlung	65
5.2.2	Leistungsdichteverteilung industriell eingesetzter Bohrlaser mit Pulsauern im Millisekunden-Bereich und deren Auswirkung auf die Fertigungsqualität	68
5.3	Leistung der reflektierten Laserstrahlung	70
5.3.1	Modellierung der Absorption und Reflexion von Laserstrahlung an Oberflächen unterschiedlicher Topografie	72
5.3.1.1	Gesamtabsorption Gaußscher Strahlung an idealisier- ten Kapillarformen	76
5.3.1.2	Einfluss unterschiedlicher Strahlparameter auf Ab- sorption und Reflexion	83
5.3.1.3	Kapillarverjüngungen in unterschiedlichen Tiefen	87
5.3.2	Experimentelle Verifizierung des Modells	88
5.3.2.1	Experimenteller Aufbau	88
5.3.2.2	Experimentelle Eingangsgrößen für die Simulations- rechnung	90
5.3.2.3	Experimentelle und rechnerische Untersuchung der Reflexionseigenschaften von Laserbohrungen	92
5.3.3	Fazit	97
5.4	Thermische Strahlung	99
5.4.1	Modellierung thermischer Emission aus kapillarförmigen Topo- grafien	99
5.4.2	Untersuchung der thermischen Strahlung an idealisierten Kapil- largeometrien	101
5.4.3	Verifizierung des Modells an realen Bohrungsgeometrien	105

6	Online-Prozessdiagnose zur Überwachung des Laserbohrens	108
6.1	Auslegung einer optimierten Prozesskontrolle für das Laserbohren . . .	108
6.1.1	Signalauswahl	108
6.1.2	Messtechnik	110
6.1.3	Messzeitpunkt	111
6.1.4	Aufbau des Laborprototyps und Integration an ein Bearbeitungs- zentrum	113
6.1.5	Steuerung der Messung, Bilderfassung	115
6.1.6	Messergebnisse	116
6.1.7	Bildverarbeitung und Grenzen des Messverfahrens	119
6.2	Geregelter Laserbohrprozess durch Einsatz von Sensorik	121
6.3	Zuverlässigkeit der Sensorik für das Laserbohren von Turbinenschaufeln	123
6.3.1	Durchbruchsensorik	123
6.3.2	Durchmessererkennung	125
7	Zusammenfassung	128
A	Materialdaten	131
A.1	Chemische Zusammensetzung und optische Eigenschaften von Inconel 713 und 718	131
	Literaturverzeichnis	132
	Danksagung	138

1 Einleitung

1.1 Motivation

Seit nunmehr einigen Jahrzehnten gewinnt der Laser in der industriellen Produktion zunehmend an Bedeutung. Während Laserschweißen, –bohren und –abtragen in vielen Bereichen bereits zum Stand der Technik gehören, stellen ein immer breiteres Werkstoffspektrum, neue Anwendungen und immer höhere Anforderungen an Bearbeitungsqualität und –geschwindigkeit neue Herausforderungen an die Laser- und Prozessentwicklung. Der Laser hebt sich durch hohe Produktionsqualität und Flexibilität bei geringen Kosten von konventionellen Fertigungstechniken ab. Dabei ist der Einsatz des Lasers besonders wirtschaftlich, wenn hohe Automatisierungsgrade und Bearbeitungsgeschwindigkeiten ermöglicht werden. Entsprechend sind Lasermaterialbearbeitungsverfahren häufig komplexer als konventionelle Fertigungstechniken. Dies stellt hohe Anforderungen an die Prozesssicherheit der Bearbeitungsverfahren und erfordert Prüffregelkreise zur Überwachung und Sicherstellung der Bearbeitungsqualität. Trotz aufwendiger Überwachung von Strahlquelle, Bearbeitungsanlage und Bauteiltoleranz ist bei vielen Verfahren eine anschließende, häufig manuelle Prüfung notwendig, um die Bauteilqualität sicherzustellen und zu dokumentieren.

Ein seit Jahren im Serienseinsatz befindliches Lasermaterialbearbeitungsverfahren ist das Laserbohren mit gepulsten Festkörperlasern, wie es beispielsweise bei der Fertigung von Kühlluftbohrungen in Turbinenschaufeln für Flugzeugtriebwerke verwendet wird. Die Maßhaltigkeit der Bohrungen wird dabei in einem aufwendigen, manuellen Prüfverfahren kontrolliert. Der Ersatz der manuellen Prüfung durch eine automatisierte *online*-Überwachung bei vergleichbarer Aussagekraft und Zuverlässigkeit stellte bei den hohen Stückzahlen, wie sie in der Produktion auftreten, einen großen wirtschaftlichen Vorteil dar.

Für das Bohren mit Millisekunden-Laserpulsen sind in der aktuellen Markt-, Literatur- und Patentlandschaft keine Prozessüberwachungsverfahren bekannt, die hinsichtlich Zuverlässigkeit, Einsetzbarkeit im industriellen Umfeld und Wirtschaftlichkeit den Anforderungen genügen.

1.2 Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines Messverfahrens für das Laserbohren von Kühlluftbohrungen in Turbinenschaufeln, welches die aufwendige manuelle Qualitätssicherung in der Serienfertigung ersetzen kann. Ausgangspunkt der Entwicklung ist eine systematische Analyse der qualitätsbestimmenden Wechselwirkungsprozesse und den damit verbundenen Prozessemissionen. Aus der Korrelation von Messsignalen mit deren Relevanz für die Qualitätsaussage sind Überwachungsmethoden abzuleiten, die sich für den Einsatz im industriellen Umfeld eignen. Schließlich sollen Methoden, die beschreiben wie die entwickelten Messtechniken zur Optimierung des Bearbeitungsverfahrens verwendet werden können, aufgezeigt und bewertet werden. Dies kann eine manuelle Anpassung von Bearbeitungsparametern anhand der Messdaten, aber auch durch direkten Eingriff der Sensorik als regelndes Element in den laufenden Bearbeitungsprozess darstellen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Das Kapitel 2 der Arbeit beschreibt die Anwendungen von Lasern mit Millisekundenpulsen für das Bohren von Kühlluftbohrungen in Turbinenschaufeln und zeigt verfahrenstechnischen Hintergründe und Anforderungen an die Bearbeitungsqualität auf. Kapitel 3 gibt dann eine Übersicht über den Stand der Technik bei der Qualitätssicherung.

Kapitel 4 beleuchtet die Grundlagen der physikalischen Prozesse bei der Wechselwirkung von Laser und Werkstoff. Ausgehend von den Eigenschaften der Laserstrahlung, deren Ausbreitung und den optischen Eigenschaften von Metallen, werden die Grundzüge der Absorption und Thermalisierung erörtert. Daraus abgeleitet werden Aussagen über die Reflexion und thermische Emission von kapillarförmigen Strukturen. Schließlich werden unterschiedliche Mechanismen des Materialabtrags diskutiert.

Auf dieser Grundlage stellt Kapitel 5 ein Tool zur Simulation der Absorption und thermischen Emission in unterschiedlichsten Kapillargeometrien vor. Damit ist der Einfluss unterschiedlicher Störungsgeometrien und Strahlparameter auf die Prozessemissionen numerisch analysierbar. Die Simulation gibt Richtlinien für die Auslegung einer Prozessüberwachung für den beschriebenen Anwendungsfall.

In Kapitel 6 wird ein kamerabasiertes Sensorsystem vorgestellt, das die Anforderungen an ein Prozessüberwachungssystem für das Laserbohren von Turbinenschaufeln erfüllt.

Messsignal und –zeitpunkt sind abgeleitet von den Ergebnissen der Simulationsrechnung und von Untersuchungen zur Schmelzdynamik. Aufbau und Ablauf der Messung sowie Algorithmen zur Bildauswertung werden vorgestellt. Die Anwendung des Sensors zur Regelung der Bearbeitung wird durch Verknüpfung von Messsystem, Laser und Fünffachs-Bearbeitungszentrum demonstriert. Schließlich werden erste Aussagen zur Zuverlässigkeit des Systems abgeleitet. Am Ende des Kapitels wird ein Ausblick für zukünftige Umsetzungen gegeben.