

Alexander Ladewig

Optische Tomographie

Online Prozessüberwachung für das
selektive Laserschmelzen

**Optische Tomographie
Online Prozessüberwachung für das selektive
Laserschmelzen**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
bei der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte
DISSERTATION
von

Dipl.-Ing. Alexander Ladewig

Tag der mündlichen Prüfung:	02. Juli 2019
Hauptreferent:	Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh

Berichte aus der Fertigungstechnik

Alexander Ladewig

Optische Tomographie

Online Prozessüberwachung für das selektive Laserschmelzen

Shaker Verlag
Düren 2019

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6976-1

ISSN 0945-0769

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Verfahrensspezialist für Additive Fertigung bei der MTU Aero Engines AG in München. Die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit erfolgte durch das wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Mein Dank gilt allen, die diese Arbeit ermöglicht haben und die durch tatkräftige Unterstützung, Gedankenaustausch und Ansporn zur Qualität und Fertigstellung beigetragen haben. Mein besonderer Dank gilt...

...Prof. Volker Schulze, meinem Doktorvater, für die ausgezeichnete Betreuung und großzügige Förderung dieser Arbeit.

...Prof. Michael Zäh (TU München) für die Übernahme des Zweitgutachtens und die vielen hilfreichen Hinweise.

...Dr. Karl-Heinz Dusel, Thomas Dautl, Dr. Jürgen Kraus und Richard Maier, meinen Vorgesetzten, für die Ermöglichung dieser Arbeit.

...Dr. Andreas Jakimov für die sehr gute firmenseitige Betreuung und die vielseitigen Orientierungshilfen innerhalb des Unternehmens.

...meinen Teamkollegen: Friedrich Kuska, Christian Liebl, Steffen Schlothauer, Wolfgang Nietsch und Christoph Rau für die sehr gute Zusammenarbeit, die freundschaftliche Atmosphäre und die große Unterstützung.

...dem ZFP-Team: Dr. Hans-Uwe Baron, Dr. Joachim Bamberg, Anian Gögelein, Benjamin Henkel und Günter Zenzinger sowie unserem Partner Volker Carl für die fruchtbaren Diskussionen und die angenehme Zusammenarbeit.

...meinen Doktorandenkollegen: Thomas Heß, Marius Lakomic, Georg Schlick, Laura Bürger, Johannes Casper, Sebastian Rott, Tobias Maiwald-Immer, Thomas Göhler, Julian von Lautz und Johannes Weirather für den umfangreichen Austausch, die persönliche Unterstützung und die entstandenen Freundschaften.

...meiner Familie für den fortwährenden Rückhalt und die bedingungslose Unterstützung bei all meinen Vorhaben und meiner Frau Stefanie für den Freiraum und die liebevolle Ermutigung auch in den schwierigen Phasen dieser Arbeit.

Für meine Kinder Valerie und Gregor

Kurzfassung

Das pulverbettbasierte selektive Laserstrahlschmelzen (englisch: *Selective Laser Melting* (SLM)) bietet als additives Fertigungsverfahren eine wirtschaftliche Möglichkeit komplexe und integrale Strukturen herzustellen. Für die lückenlose Qualitätssicherungskette ist die Überwachung des Fertigungsprozesses ein wesentlicher Baustein, der die Einhaltung relevanter Parameter und somit eine reproduzierbare Bauteilqualität gewährleisten soll.

Im Fokus der vorliegenden Arbeit steht die Entwicklung und experimentelle Validierung eines neuartigen Prozessüberwachungssystems – der Optischen Tomographie (OT). Diese ermöglicht durch kontinuierliche Erfassung des Schmelz- und Erstarrungsvorgangs die Detektion sowohl systematischer, als auch singulärer Prozessabweichungen.

Zunächst werden die erfassten OT-Signale hinsichtlich immanenter Eigenschaften untersucht und Kenngrößen für Standard-Prozessbedingungen abgeleitet. Basierend auf statistischer Versuchsplanung werden die gefundenen OT-Kennwerte mit ausgewählten Kernwirkgrößen (Laserleistung, Geschwindigkeit, Hatchabstand, Schichtstärke und Fokusbildungsdurchmesser) des SLM-Prozesses sowie resultierenden Bauteileigenschaften verknüpft.

Des Weiteren wird im Rahmen dieser Dissertation die Fähigkeit der OT zur Detektion von Einzeldefekten gezeigt. Zu den untersuchten Phänomenen gehören das sogenannte *Process Flipping*, ein Wechsel des Schweißmodus, sowie die Erkennung von eingebrachtem Fremdmaterial. Die Entstehung des bei der additiven Fertigung typischen Bindefehlers kann durch die OT indirekt über die Erkennung von *Balling* erfasst werden. Die Experimente zeigen, dass sowohl eine Defokussierung des Lasers durch Schweißrauch als auch Auswürfe aus dem Schmelzbad die Ursache für *Balling* sein können.

Abstract

Powder-bed-based laser beam melting (SLM) is an additive manufacturing (AM) process offering an economic possibility to produce complex and integral structures. For quality assurance, monitoring of the production process is necessary to ensure compliance with relevant process parameters and thus, reproducible component quality.

The focus of this work is the development and experimental validation of a novel process monitoring system: optical tomography (OT). OT enables the detection of both systematic and singular process deviations by continuous detection of the melting and solidification process.

The acquired OT signals are examined for inherent properties and parameters for standard process conditions are derived. Based on a statistical experimental design, the determined OT properties are correlated to selected SLM process parameters (laser power, speed, hatch spacing, layer thickness and focus diameter) and the resulting component properties.

In addition, this work demonstrates the ability of OT to detect individual defects: Among the phenomena studied are the so-called process flipping (a change in the welding mode) and the detection of introduced foreign substances. OT also enables indirect detection of lack of fusion defects (common for AM) through the detection of balling. The experiments show that both defocusing of the laser by welding fumes and discharges from the molten bath can be the cause for balling.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen	IV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Aufbau der Arbeit	4
2 Stand der Technik	6
2.1 Pulverbettbasiertes Laserstrahlschmelzen	6
2.1.1 Grundlagen und Verfahrensprinzip	6
2.1.2 Prozessführung und Belichtungsstrategie	9
2.1.3 Schmelz- und Erstarrungsprozess	13
2.1.4 Wichtige Einflussfaktoren und Prozessparameter	16
2.1.5 Balling und Gefügefehler	24
2.2 Optische Online-Prozessüberwachung beim SLM	33
2.3 Abgrenzung zu thermografischen Off-Axis- Überwachungssystemen	39
3 Optische Tomographie – ein neues System zur Prozessüberwachung	41
3.1 Material, Methodik und verwendete Komponenten	41
3.1.1 Grundidee des Überwachungssystems	41
3.1.2 SLM-Anlage	42
3.1.3 Kamerasystem und optische Komponenten	44
3.1.4 Verwendeter Werkstoff – Inconel718	46
3.1.5 Verwendetes Pulvermaterial	47
3.2 Qualifizierung des Kamerasystems	49
3.2.1 Linearität und zeitliche Auflösung	50
3.2.2 Radiometrische Auflösung	53
3.2.3 Geometrische Auflösung und Rahmenbedingungen	55

3.3	Charakterisierung der Überwachungsaufgabe	60
3.3.1	Schmelzbadgeometrie.....	60
3.3.2	Spektrale Eigenschaften des Schmelzbades	64
3.3.3	Thermisches Feld	69
3.4	Realisierung der Optischen Tomographie.....	73
3.4.1	Auswahl Spektralbereich	74
3.4.2	Blende und Intensitätsdämpfung.....	76
3.4.3	Einhausung und Prozesskammerabdichtung.....	76
3.4.4	Filterung und Aufnahmealgorithmik.....	77
3.4.5	Belichtungszeit und Intensitätsschwelle	82
3.4.6	Fazit.....	83
4	Charakterisierung des Standardprozesses und systematische Abweichungen	84
4.1	Methodik.....	84
4.1.1	Vorgehen und Versuchsbaujob	84
4.1.2	Kennwerte und Auswertung	85
4.1.3	Ermittlung eines funktionalen Zusammenhangs	92
4.2	Eigenschaften unter Standardbedingungen.....	93
4.2.1	Einfluss des Hatchwinkels und des Versatzes	93
4.2.2	Einfluss der Bauposition	95
4.2.3	Einfluss der Zwischenlagentemperatur und der Bauhöhe	98
4.2.4	Einfluss der Bauteilgeometrie und Baujobanordnung	105
4.3	Empfindlichkeit des Systems gegenüber Änderungen der Wirkgrößen.....	106
4.3.1	Statistische Versuchsplanung	107
4.3.2	Zielgrößen	111
4.3.3	Versuchsdurchführung	114
4.3.4	Kompensation prozessimmanenter Einflussgrößen auf die OT-Daten.....	115

4.3.5	Ergebnisse	117
4.4	Anwendung der Überwachung im Serienprozess	130
4.4.1	Ableitung von Toleranzgrenzen für die Prozessüberwachung	130
4.4.2	Anwendungsbeispiele und Möglichkeiten	135
5	Detektion von lokalen Einzeleffekten	138
5.1	Process Flipping – Coldspots	139
5.2	Pulverkontamination	142
5.3	Pulveraufwurf	144
5.3.1	Beschreibung der Prozessstörung	144
5.3.2	Versuchsdurchführung zur Provokation von Pulveraufwürfen	146
5.3.3	Ergebnisse	147
5.4	Hotspot – Defokussierung des Lasers	154
5.4.1	Beschreibung der Prozessstörung	155
5.4.2	Versuchsdurchführung	155
5.4.3	Ergebnisse	157
5.5	Prüfung auf lokale Prozessabweichungen	164
5.5.1	Generisches Vorgehen zur Baujobanalyse	164
5.5.2	Validierung des vorgeschlagenen Algorithmus	169
6	Fazit und Ausblick	176
	Literaturverzeichnis	179
	Abbildungsverzeichnis	196
	Tabellenverzeichnis	203
	Veröffentlichungen	204
	Liste der Patente und Patenteinreichungen	205
	Lebenslauf	207