

David-Khuong Dang
Porositäts- und Rauheitsmessung beim Laserstrahlschmelzen
mit der Laser-Speckle-Photometrie

Band 84

David-Khuong Dang

**Porositäts- und Rauheitsmessung
beim Laserstrahlschmelzen mit der
Laser-Speckle-Photometrie**

TUD*press*

2022

Die vorliegende Arbeit wurde unter dem Titel „Porositäts- und Rauheitsmessung beim Laserstrahlschmelzen mit der Laser-Speckle-Photometrie“ am 28.10.2021 als Dissertation an der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Dresden eingereicht und am 19.07.2022 verteidigt.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Czarske (TU Dresden)

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Gerald Gerlach (TU Dresden)
Prof. Dr.-Ing. Christian Boller (Universität des Saarlandes)

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.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

ISBN 978-3-95908-460-4

© TUDPress
Thelem Universitätsverlag und
Buchhandlung GmbH & Co. KG
Dresden
Tel.: 0351/472 14 63 | Fax: 0351/479 69 721
<http://www.tudpress.de>

TUDpress ist ein Imprint von Thelem.
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.
Gesetzt vom Autor.
Printed in Germany.

Vorwort des Herausgebers

In jüngerer Zeit steigt die Bedeutung additiver Fertigungsverfahren stark an, da sie sich vorteilhaft für Einzelanfertigungen und kleine Stückzahlen nutzen lassen und die Produkte in vielen Bereichen immer weiter individualisiert werden können. Eines der wichtigsten Verfahren ist dabei das Laserstahlschmelzen von Metallen. Beim Laserstrahlschmelzen wird schichtweise metallisches Pulver durch den entsprechend angesteuerten Laserstrahl selektiv aufgeschmolzen, ehe es dann mit der gewünschten Form und Geometrie erstarrt. Beim Fertigungsprozess finden also kontinuierlich und gleichzeitig Erwärmungs-, Aufschmelz-, Erstarrungs- und Abkühlprozesse statt, die stark durch die Prozessparameter bestimmt werden. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Laserleistung und die Dicke der aufzuschmelzenden Pulverschicht. Bei ungünstiger Wahl der Parameter können im Volumen des wachsenden Werkstücks hohle Stellen, d.h. Poren, entstehen und sich eine raue Oberfläche bilden, die dann in der nachfolgenden Schicht wieder Poren verursachen kann. Solche Poren bzw. Inhomogenitäten führen häufig zu Materialdefekten und damit zu unbrauchbaren Werkstücken. Ziel ist es deshalb, diese Defekte direkt im Fertigungsprozess zu erkennen und die Fertigung abzubrechen oder die Parameter des Fertigungsprozesses entsprechend so zu steuern, dass Defekte nicht mehr auftreten.

Als besonders wichtig hat sich dabei die Überwachung der Schmelztemperatur erwiesen. Dies erfolgt bisher zumeist durch ein Monitoring des aufgeschmolzenen Bereichs mittels berührungsloser Temperaturmessung oder hochauflösender Bildüberwachung. Allerdings bietet bisher keines dieser Verfahren eine befriedigende Lösung zur Charakterisierung der entstehenden Materialeigenschaften.

Die vorgelegte Arbeit untersucht deshalb, inwieweit die Laser-Speckle-Photometrie für diese Überwachungsaufgabe geeignet ist. Dieses Verfahren ist technisch deshalb interessant, weil mit ihr an der Werkstückoberfläche orts aufgelöst Deformationszustände ermittelt werden können. Diese sind einerseits von der temperaturbedingten Ausdehnung und damit der Temperatur beeinflusst, aber – infolge der optischen Wechselwirkungen des Laserstrahls mit der Oberfläche des Werkstücks – auch von Inhomogenitäten der Oberfläche und der Porosität im oberflächennahen Bereich. Die hier vorgelegte Arbeit untersucht nun sehr systematisch und gründlich den Einfluss von Rauheit und der Porosität, um Aussagen zur Eignung der LSP für das Prozessmonitoring beim Laserstrahlschmelzen ableiten zu können. Damit leistet sie einen wesentlichen Beitrag für die Entwicklung dieser Methode zur berührungslosen und rückwirkungsfreien Überwachung für das Laserstrahlschmelzen. Neben den wissenschaftlichen Erkenntnissen könnte sie deshalb möglicherweise auch Bedeutung für eine industrielle Nutzung erlangen. Aus diesem Grund wünsche ich auch diesem Band der Reihe „Dresdner Beiträge zur Sensorik“ die ihr gebührende Aufmerksamkeit!

Dresden im August 2022
Gerald Gerlach

Kurzfassung

Additive Fertigungsverfahren, wie das Laserstrahlschmelzen von Metallen, erfahren eine immer größere Bedeutung, da sie insbesondere für eine Einzelanfertigungen und kleine Stückzahlen eine Vielzahl an Vorteilen aufweisen. Jedoch können aufgrund der Komplexität des Prozesses und verschiedener Störeinflüsse Defekte in den gefertigten Materialien auftreten. Dadurch entstehen beispielsweise höhere Rauheiten und eine größere Porosität, die zu einer Verschlechterung der nachfolgenden Fertigung und der mechanischen Eigenschaften der Bauteile führen. Infolge des prozesstypischen Schichtaufbaus, bleiben diese Abweichungen im Material meist unbemerkt und müssen für die Qualifizierung der Bauteile nachträglich mit aufwendigen und kostenintensiven Prüfmethoden untersucht werden. Somit besteht ein Bedarf an Prüftechniken während des Fertigungsprozesses zur Defekterkennung und gleichzeitigen Materialcharakterisierung.

Als potenzielle Lösung wird die Laser-Speckle-Photometrie vorgestellt und für die Anwendung beim Laserstrahlschmelzen weiterentwickelt. Die LSP ist eine zerstörungsfreie und optische Prüftechnik, die zur Zustandscharakterisierung von Materialien dient. Die Methodik basiert auf der Analyse von statischen oder zeitlich variablen Speckle-Mustern, die durch kohärentes Licht auf rauen Oberflächen hervorgerufen werden. Mithilfe induzierter Oberflächenverformungen entstehen charakteristische Speckle-Änderungen, die mit den mechanischen und thermischen Materialeigenschaften korreliert werden können. Ziel dieser Dissertation ist die Erkennung der veränderten Materialeigenschaften durch höhere Rauheiten und Porosität.

Zu diesem Zweck werden durch eine gezielte Lasererwärmung Temperaturgradienten und thermische Dehnungen in den Proben hervorgerufen, um die dabei entstehenden Speckle-Änderungen zu analysieren. Die zur Auswertung angewendete Differenzkorrelationsfunktion untersucht das Ort-Zeit-Verhalten der Speckle während der quasi-statischen Zustandsänderung, welches einen Bezug zu dem spezifischen Materialverhalten ermöglicht. Hierbei müssen die optischen Wechselbeziehungen während der Lasererwärmung von Metallen und thermomechanischen Wechselwirkungen untersucht werden, um ein tiefes Verständnis über die Methodik und die generierten Messdaten zu erlangen.

Die ersten Versuche zeigen eine hohe Präzision des LSP-Signals zur Messung der Rauheiten und der Porosität. Die ermittelten Daten korrelieren zu den erzeugten Temperaturgradienten und thermischen Dehnungen. Die entwickelten Finite-Elemente-Methode-Modelle dienen zur Bestimmung der spezifischen Absorption der Materialien und zur Bewertung des Porositätseinflusses auf die Temperaturgradienten und thermischen Dehnungen. Auf Basis dieser Erkenntnisse validieren die berechneten Temperaturänderungen und Dehnungen die gemessenen LSP-Daten und bestätigen die Korrelationen zwischen dem Messsignal und den Messgrößenänderungen. Die Ergebnisse belegen, dass mit der LSP abweichende Rauheiten und Porosität an Metallen detektiert werden können, die beim Laserstrahlschmelzen auftreten. Damit eröffnet sich möglicherweise der Weg für eine industrielle Anwendung der LSP für solche Werkstoffe.

Abstract

Additive manufacturing processes such as Selective Laser Melting (SLM) of metals are becoming increasingly important as they offer a number of advantages, especially for prototyping and production of small quantities. However, due to various interferences, defects can occur in the manufacturing process. This results in higher roughness and porosity of the material which leads to a deterioration of the subsequent manufacturing process and the mechanical properties of the components. Due to the process-typical layer structure, these deviations remain unnoticed in the manufactured components and have to be examined subsequently with complex and cost-intensive testing methods for the qualification of the components. Thus, there is a need for inspection techniques during the manufacturing process for defect detection and simultaneous material characterization.

The Laser Speckle Photometry is presented as a potential solution and is further developed for the SLM applications. LSP is a non-destructive and optical testing technique used for characterization of materials. The methodology is based on the analysis of static or time-varying speckle patterns induced by coherent light on rough surfaces. With the help of induced surface deformations, characteristic speckle changes are generated, which can be correlated with mechanical and thermal material properties. The aim of this thesis is the detection of the changed material properties due to higher roughness and porosity.

For this purpose, temperature gradients and thermal strains are induced in the samples by targeted laser heating in order to analyze the resulting speckle changes. The difference correlation function applied for the evaluation investigates the spatio-temporal behavior of the speckle during the quasi-static state change, which allows a reference to the specific material behavior. Here, the optical interactions during laser heating of metals and thermomechanical interactions need to be investigated to gain deep understanding about the methodology and the generated measurement data.

The initial experiments show high precision of the LSP signal for measuring roughness and porosity. The obtained data correlate to the generated temperature gradients and thermal strains. The developed finite element method models are used to determine the specific absorption of the materials as well as to evaluate the porosity effect on the temperature gradients and thermal strains. Based on these findings, the calculated temperature changes and strains validate the measured LSP data and confirm the correlations between measured signal and measured variable changes. The results demonstrate that LSP can detect aberrant roughness and porosity on metals that undergo laser beam melting. This may pave the way for a future industrial application of the LSP for these materials.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	III
Inhaltsverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielstellung	2
1.3 Aufbau der Dissertation	3
2 Grundlagen und Stand der Technik	5
2.1 Laserstrahlschmelzverfahren von Metallen	5
2.1.1 Verfahrensablauf	5
2.1.2 Belichtungsprozess	6
2.1.3 Störeinflüsse	8
2.1.4 Defekte	9
2.1.5 Prozessüberwachung	13
2.2 Absorption von Laserstrahlung	22
2.2.1 Eigenschaften von Laserstrahlung	22
2.2.2 Absorption in Metallen	23
2.2.3 Absorption beim Laserstahlschmelzen	25
2.3 Thermische Wechselwirkungen beim Laserstrahlschmelzen	26
2.3.1 Wärmeübertragungsmechanismen	26
2.3.2 Wärmeausdehnung	29
2.4 Laser-Speckle-Photometrie	32
2.4.1 Speckle-Phänomen	32
2.4.2 Verfahrensprinzip	33
2.4.3 Signalauswertung	35
2.5 Zusammenfassung	37
3 Materialien und Methoden	39
3.1 Additiv gefertigte Proben mit unterschiedlichen Defekten	39
3.1.1 Proben und Materialeigenschaften	39
3.1.2 Herstellung der rauen und porösen Proben	39
3.1.3 Charakterisierung der rauen und porösen Proben	41

3.2	Rauheits- und Porositätsmessung mittels LSP.....	47
3.2.1	Versuchsaufbau	47
3.2.2	Auswertung der Speckle-Aufnahmen mit der LSP	50
3.3	Numerische Modelle zur Simulation von Temperaturen und Dehnungen	51
3.3.1	Einfluss der Porentopologie	52
3.3.2	Parameteroptimierung zur Bestimmung der Absorption.....	53
3.3.3	Thermomechanische Analyse.....	57
3.4	Zusammenfassung	59
4	Ergebnisse und Diskussion.....	61
4.1	Experimentelle Ergebnisse.....	61
4.1.1	Vorgehensweise	61
4.1.2	Einfluss der Rauheit	62
4.1.3	Einfluss der Porosität	67
4.1.4	Gemeinsamer Einfluss von Rauheit und Porosität	69
4.2	Numerische Ergebnisse.....	73
4.2.1	Vorgehensweise	73
4.2.2	Einfluss der Porentopologie	73
4.2.3	Parameteroptimierung zur Bestimmung der Absorption.....	80
4.2.4	Einfluss der Rauheit	82
4.2.5	Einfluss der Porosität	86
4.2.6	Gemeinsamer Einfluss von Rauheit und Porosität	90
4.3	Vergleich und Diskussion.....	93
4.4	Zusammenfassung	95
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	97
5.1	Zusammenfassung der Arbeit	97
5.2	Ausblick für zukünftige Forschungsarbeiten.....	99
	Literatur.....	103
	Liste der Symbole und Abkürzungen.....	113
	Danksagung.....	117

1 Einleitung

1.1 Motivation

In der jüngeren Vergangenheit haben Verfahren der additiven Fertigung immer größere Bedeutung erfahren. Das ergibt sich aus den Vorteilen, die mit diesen Herstellungsmethoden verbunden sind:

- nahezu unbegrenzte Formvielfalt,
- großes verfügbares Materialspektrum und
- direkte Fertigung auf Basis der CAD-Daten.

Damit können sie für nahezu alle Anwendungsbereiche genutzt werden, z.B. in der Medizintechnik, Automobiltechnik oder Luft- und Raumfahrt. Zudem ist die additive Fertigung werkzeuglos und benötigt keine Rüstzeiten, weshalb sie sich besonders für Einzelanfertigungen und kleine Stückzahlen anbietet [1].

Eine weit verbreitete additive Fertigungstechnik für Metalle ist das Laserstrahlschmelzen. Hierbei werden metallische Pulver selektiv durch einen Laser aufgeschmolzen und erstarren zur gewünschten Geometrie [2-4]. Die Bauteilherstellung unterliegt einer Vielzahl an Fertigungseinflüssen, die sich auf die Schmelzvorgänge und schließlich die lokale oder auch gesamte Bauteilqualität auswirken. Eine der Hauptursachen ist der thermische Energieeintrag zur Pulveraufschmelzung, der zu extremen Temperaturgradienten und hohen Abkühlraten führt [5, 6]. Dabei werden die Erwärmungs- und Abkühlungsvorgänge durch die verwendeten Fertigungsparameter, z.B. Laserleistung oder Schichtdicke, gesteuert und sind somit nichtlinear und multivariabel beeinflusst. Deshalb entstehen häufig Materialdefekte, wie Poren oder Inhomogenitäten in der Oberflächentopografie. Dementsprechend erhöht sich die Gesamtporosität des Bauteils und die mechanischen Eigenschaften verschlechtern sich. Treten die Fehler unentdeckt auf, werden sie aufgrund der lagenweisen Fertigung kontinuierlich fortgesetzt oder befinden sich unerkant im Bauteil. Die Folgen sind fehlerhafte Bauteile mit geringerer Materialqualität, die erst nach der Herstellung und Entnahme sichtbar werden.

Aus diesem Grund besteht ein Bedarf an geeigneten Prüfverfahren für das Laserstrahlschmelzen, um die auftretenden Schwankungen im Prozess und am Bauteil zu detektieren. Auf Basis der ermittelten Daten können unmittelbare Änderungsmaßnahmen durchgeführt oder ein Abbruch des fehlerhaften Herstellungsprozesses eingeleitet werden. Zusätzlich kann durch die Gewährleistung einer stabilen Fertigung und konstanter Materialeigenschaften der Aufwand für die späteren kostenintensiven Bauteilprüfungen reduziert und eine höhere Wirtschaftlichkeit der Produktion erreicht werden. Zu diesem Zweck wurden in der Vergangenheit verschiedene Prüfmethoden, wie das Meltpool-Monitoring oder die hochauflösende Bildüberwachung, entwickelt. Für diese Verfahren werden Informationen über die gefertigte Oberflächenqualität, Schmelzvorgänge oder resultierende Temperaturverteilungen benötigt. Beispielsweise ist aufgrund der linienweisen und lagenweisen Pulveraufschmelzung die entstehende Oberflächentopografie ein entscheidender Faktor zur

Bewertung des Schmelzprozesses. Anhand dessen können Aussagen zum Energieeintrag oder zur Materialwechselwirkung abgeleitet werden [7].

Bisherige Arbeiten zum Meltpool-Monitoring [8-10], zur hochauflösende Bildüberwachung [11-13] oder zur Pyrometrie [14-18] konzentrierten sich auf die Untersuchung variierender Fertigungsparameter und deren Einflüsse auf den Prozess. Jedoch bietet keines der genannten Verfahren die Möglichkeit zur Charakterisierung der entstehenden Materialeigenschaften von fehlerhaften Bauteilen. Ferner sind an den Fertigungsanlagen aufwendige und kostenintensive Kameras oder optische Sensoren zur Temperaturmessung notwendig. Deswegen werden neue Lösungen zum Qualitätsmonitoring gesucht, mit denen Defekte und Schwankungen im Laserstrahlschmelzen erkannt und Informationen über die Materialcharakteristik ermittelt werden können.

1.2 Zielstellung

Zielstellung dieser Dissertation ist die Anwendung der Laser-Speckle-Photometrie (LSP) zur Untersuchung von Poren und Inhomogenitäten in der Oberflächentopografie bei Metallen, die mit dem Laserstrahlschmelzen gefertigt wurden.

Die LSP ist ein optisches Prüfverfahren, das auf der Betrachtung von Speckle-Mustern basiert. Speckle-Muster sind Interferenzbilder, die entstehen, wenn eine Oberfläche kohärentes Licht reflektiert. Durch mechanische oder thermische Dehnungen werden in den Prüfmaterialien Oberflächenänderungen hervorgerufen, die zugleich eine Änderung des Speckle-Musters erzeugen. Diese sind wiederum charakteristisch für die mechanischen und thermischen Eigenschaften des Materials, wodurch Korrelationen zwischen den Materialeigenschaften und den LSP-Messsignalen möglich sind [19-21].

Beim Laserstrahlschmelzen entstehen thermische Dehnungen durch die pulsartigen Lasererwärmungen. Somit ist die LSP für das Monitoring des Laserstrahlschmelzverfahrens ein potenziell geeignetes Verfahren, da durch die Betrachtung der Speckle-Änderungen das thermische Verhalten der gedruckten Metalle bewertet werden kann.

In dieser Arbeit werden Proben mit unterschiedlich ausgeprägter Rauheit und Porosität untersucht, um die spezifischen Materialwechselwirkungen während einer Lasererwärmung mit der LSP-Methodik zu analysieren. Im Ergebnis soll das thermische Verhalten der laserstrahlgeschmolzenen Metalle im Vergleich zur Speckle-Änderung dargestellt werden. Da die Ausbildung von Poren und Inhomogenitäten in der Oberfläche bedeutende Ursachen für Qualitätsminderungen darstellen, werden hierzu die entstehenden Temperaturänderungen sowie optische Wechselwirkungen der Absorption in den defektbehafteten Metallen betrachtet. Die erfolgreiche Weiterentwicklung der LSP bietet für die Anwender im Bereich der additiven Fertigung eine weitere aussichtsreiche Möglichkeit zur Charakterisierung der gefertigten Bauteile, um auf Basis der ermittelten Informationen Optimierungen im Prozess durchzuführen. In der Forschungsarbeit werden wichtige Erkenntnisse zum Verhalten der LSP-Signale und Grundlagen für eine mögliche Implementierung der Messmethode in das Laserstrahlverfahren gewonnen.

1.3 Aufbau der Dissertation

Diese Arbeit ist wie folgt aufgebaut:

Kapitel 1 erklärt die Motivation und die entsprechenden Ziele der Dissertation.

Kapitel 2 beginnt mit der Beschreibung des Laserstrahlschmelzverfahrens und zeigt relevante Störeinflüsse im Prozess, die Materialdefekte hervorrufen können. Anschließend werden die dafür bisher entwickelten optischen Prüfmethoden, wie das Melt-Pool-Monitoring oder die Pyrometrie, vorgestellt. In diesem Zusammenhang werden die optischen und thermischen Wechselwirkungen bei der Lasererwärmung von Metallen gezeigt. Damit verbunden werden das Prinzip und die Signalauswertung der LSP-Technik für diese Arbeit erläutert.

Kapitel 3 umfasst die Probencharakterisierung und stellt die LSP-Untersuchung zur Bestimmung der Rauheit und Porosität vor. Weiterhin wird die Vorgehensweise für die numerische Analyse der Rauheits- und Porositätsinflüsse beschrieben.

Kapitel 4 zeigt die experimentellen LSP-Ergebnisse der Rauheits- und Porositätsbestimmung im Vergleich zu Temperaturdaten der Pyrometermessungen, die als Referenz verwendet werden. Zusätzlich werden anhand der Simulationsergebnisse die Einflüsse der Rauheit und Porosität verdeutlicht und mit den experimentellen Ergebnissen verglichen. Dabei werden die Zusammenhänge zwischen der Absorption und Rauheit sowie der berechneten Dehnung und dem LSP-Signal gezeigt.

Kapitel 5 fasst die wesentlichen Ergebnisse der aktuellen Forschung zusammen und gibt Empfehlungen für zukünftige Arbeiten.

2 Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Laserstrahlschmelzverfahren von Metallen

Additive Fertigungsverfahren weisen ein hohes Potenzial zur Fertigung individueller, funktionsintegrierter und komplexer Produkte auf. Sie zählen zu den urformenden Verfahren, bei denen eine nahezu beliebig gestaltbare Geometrie element- oder schichtweise aufgebaut wird [2-4]. Eines der bedeutendsten Verfahren für metallische Bauteile ist das Laserstrahlschmelzen, das auch unter der englischen Bezeichnung Selective Laser Melting (SLM) bekannt ist.

Im Prozess wird durch eine thermisch induzierte Energie mit einem Laser pulverförmiges Ausgangsmaterial selektiv aufgeschmolzen, das dann anschließend zur gewünschten Form erstarrt [22]. Die Schicht entsteht durch die Erstarrung des Schmelzbads, die vor allem durch Wärmeleitung in darunterliegende Bauteilbereiche oder in die Bauplattform begünstigt wird [23]. Grundsätzlich können alle schweißbaren metallischen Werkstoffe, wie Titan-, Aluminium- oder Nickelbasislegierungen, verarbeitet werden. Die nahezu vollständig dichten Bauteile weisen hohe mechanische Festigkeitswerte auf, weswegen die Anwendung des Verfahrens attraktiv für die Automobil- oder Luft- und Raumfahrttechnik ist [2, 3].

Das Verfahren eignet sich insbesondere für eine schnelle Herstellung von Prototypen und für Produktionen mit geringen bis mittleren Stückzahlen. Diesbezüglich muss der bekannteste Vorteil der schnellen Bauteilherstellung zugleich unter dem Aspekt wirtschaftlicher Effizienz betrachtet werden. Die Fertigung eines komplexen oder großen Bauteils kann bis zu 20 h beanspruchen. Deshalb ist die Belegung der Anlagen ein Hauptaspekt einer nutzbringenden Fertigung. Jedoch sind die Genauigkeit und Langzeitstabilität der Fertigung immer noch große Herausforderungen. Dadurch können im Prozess unbemerkt Fehler auftreten, die zu Bauteilen mit ungenügender Qualität führen, wodurch eine ununterbrochene Fertigung und effiziente Anlagenausnutzung beeinträchtigt wird.

2.1.1 Verfahrensablauf

Das Laserstrahlschmelzen von Metallen findet unter Schutzgasatmosphäre statt und erfolgt in drei wiederholenden Prozessschritten, die in Abbildung 2.1 gezeigt sind [24]:

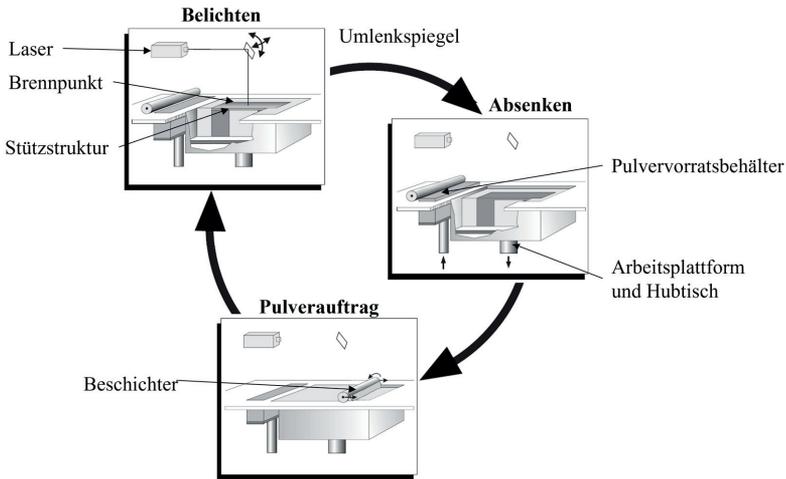


Abbildung 2.1: Prozesszyklus im Laserstrahlschmelzverfahren (aus [24]).

- 1 Im ersten Schritt verteilt ein Beschichter das pulverförmige Ausgangsmaterial gleichmäßig über der Bauebene. Überschüssiges Pulver wird während des Vorgangs in einen zusätzlichen Behälter transportiert und kann nach einer Aufbereitung wiederverwendet werden. Die Bauteile werden für ein einfacheres Prozesshandling und eine bessere Wärmeleitung häufig auf Substratplatten gefertigt, um eine höhere geometrische Maßhaltigkeit zu erzielen.
- 2 Im zweiten Schritt belichtet ein hochenergetischer Laserstrahl selektiv die Pulverschicht, um das Pulver für die gewünschte Geometrie aufzuschmelzen. Während des Erstarrungsvorgangs verschmilzt das Material mit der darunterliegenden Lage zu einer festen Schicht. Die Abkühlungsvorgänge finden mit Abkühlgeschwindigkeiten bis zu $3,5 \cdot 10^6$ K/s statt und können große Eigenspannungen verursachen [11].
- 3 Im Anschluss wird mithilfe eines integrierten Hubtisches die Bauteilplattform abgesenkt und der Zyklus wiederholt sich, indem der Beschichter neues Pulvermaterial aus dem Pulvervorratsbehälter über die Bauteilebene verteilt. Auf diese Weise werden die bereits gefertigten Schichten vollständig mit Pulver bedeckt.

2.1.2 Belichtungsprozess

Im Belichtungsprozess (Abbildung 2.2) werden zunächst einzelne Bahnen (Scanvektoren) zu einer Schicht und anschließend die einzelnen Schichten zum Gesamtbauteil aufgeschmolzen. Dabei bestimmt die gewählte Belichtungsstrategie die Anordnung und Orientierung der Scanvektoren.

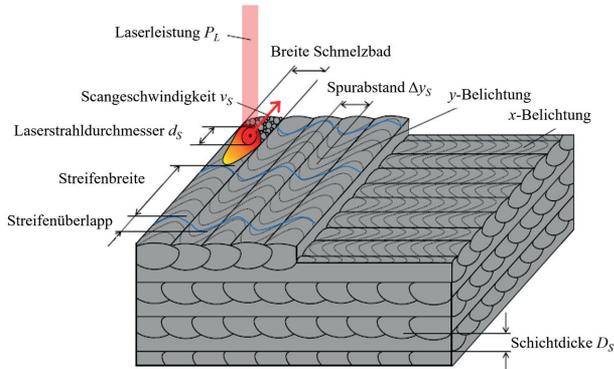


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung des Belichtungsprozesses im Laserstrahlschmelzens (aus [23]).

Die Pulveraufschmelzung wird durch eine Vielzahl an Fertigungsparametern beeinflusst, die im Zusammenhang mit dem sich kontinuierlich bewegenden Laserstrahl stehen [23]:

- Die eingekoppelte **Laserleistung** P_L ist die Menge induzierter Energie zur Pulveraufschmelzung.
- Die gewählte Laserleistung hängt vom Material und der gewählten **Schichtdicke** D_S ab. Gleichzeitig wird über die Schichtdicke D_S die Menge des aufzuschmelzenden Pulvers sowie die Höhe der gefertigten Lagen bestimmt, welche die Wärme abführen.
- Der **Laserstrahldurchmesser** d_S begrenzt den Bereich auftreffender Laserstrahlung.
- Die **Scangeschwindigkeit** v_S bestimmt die Geschwindigkeit des bewegten Lasers in der x - y -Ebene, woraus sich die lokale Aufschmelzzeit ableitet.
- Der **Spurbastand** Δy_S stellt die Distanz benachbarter Schmelzbahnen ein, wodurch die Wärmeeinflusszone gesteuert wird.

Die bedeutsamste Größe zur Pulveraufschmelzung mit Laserenergie ist die Volumenergiedichte

$$V_{ED} = \frac{P_L}{v_S \cdot \Delta y_S \cdot D_S}, \quad (2.1)$$

die von der induzierten Laserleistung P_L und vom aufgeschmolzenen Volumen abhängt. Der Prozess weist aufgrund der sich gegenseitig beeinflussenden Fertigungsparameter eine hohe Komplexität auf. Die beschriebenen Größen steuern das lokale und temporäre Aufschmelzverhalten des Pulvers, wodurch die erreichbare Bauteildichte und die Materialqualität beeinflusst werden [5, 25-27]. Eine sinkende Laserleistung oder steigende Scangeschwindigkeit verringern die Energiedichte und führen zu einer Verschlechterung der Schmelzbahnqualität. Dabei sind die Ursachen eine unzureichende Verschmelzung mit der unterliegenden Schicht oder benachbarten Spur [28] und eine Aufspaltung

der Schmelzbahn („Balling“-Effekt) [29]. Eine genauere Beschreibung der Folgen einer verringerten V_{ED} als Ursache für Bildung von Defekten ist in Abschnitt 2.1.4 dargelegt.

Zur Einordnung der einstellbaren Fertigungsparameter sind diese exemplarisch für verschiedene Anlagen in Tabelle 2.1 zusammengefasst. Dabei werden Systeme miteinander verglichen, die in einem ähnlich großen Bauraum von etwa 250 mm x 250 mm x 300 mm arbeiten.

Tabelle 2.1: Technische Daten ausgewählter Laserstrahlschmelzanlagen.

Hersteller	EOS	SLM Solutions	GE Additive	Renishaw
Anlage	M 290 [30]	SLM®280 [31]	M2 Series 5 [32]	AM 400 [33]
Bauraum [mm ³]	250 x 250 x 325	280 x 280 x 365	245 x 245 x 350	250 x 250 x 300
Laserleistung [W]	400	400 - 700	1000	400
Scangeschwindigkeit [m/s]	7	10	4,5	2
Schichtdicke [µm]	20 - 60	20 - 75	25 - 120	20 - 100
Laserstrahldurchmesser [µm]	100	80 - 115	70 - 500	70

2.1.3 Störeinflüsse

Im Laserstrahlschmelzverfahren verursachen verschiedene Störeinflüsse Schwankungen im Prozess. In den Arbeiten von Sehrt [23] und Krauss [34] werden anhand der Steuergrößen mögliche Einflussfaktoren und deren Wechselwirkung auf die Prozessstabilität und Bauteilqualität dargestellt:

- **Prozesssteuerung:** Die zuvor beschriebenen Fertigungsparameter und die Belichtungsstrategie beeinflussen die lokal induzierte Energiemenge und somit die resultierenden Absorptions- und Schmelzvorgänge im Material. Infolge ungeeigneter Parameter treten unvorhersehbare Wechselwirkungen auf, die sich maßgeblich auf die Qualität der Schmelzbahnen und daher auf die Oberfläche auswirken [34]. Daraus können Defekte, wie Poren oder abweichende Oberflächentopografien, resultieren, die in Abschnitt 2.1.4 ausführlich erläutert werden. Vor allem die reduzierte Laserleistung durch beispielsweise abgenutzte oder verschmutzte Komponenten der Anlage werden in dieser Arbeit betrachtet.
- **Strahlsystem:** Essenzielle Parameter der Laserquelle, wie die Ausgangsleistung, Betriebsart, Wellenlänge, Fokussierung und Scanposition, beeinflussen den Belichtungsvorgang.
- **Material:** In Abhängigkeit vom Fertigungsverfahren bestimmen die Ausgangswerkstoffe die mechanischen Eigenschaften der Bauteile. Dabei werden der Schmelz- und Beschichtungsvorgang vom Zustand des Pulvers (Pulvergröße), von Abweichungen in den Werkstoffchargen oder von Verunreinigungen beeinflusst [4].

- **Beschichtersystem:** Kollisionen des Beschichters durch Positionierfehler der Bauplattform, variierende Pulvermengen bzw. Partikelgrößen oder Abnutzung der Geräte können zu Delaminationen, Zerstörungen des Bauteils und letztlich zum Prozessabbruch führen.
- **Atmosphäre:** Änderungen der atmosphärische Umgebungsbedingungen treten durch Verunreinigungen, Strömungsfeldänderungen des Schutzgases oder variierende Temperaturverhältnisse auf.

Bei der Betrachtung der Störeinflüsse ist vor allem die thermische Energie zur Pulveraufschmelzung hervorzuheben. Während der kurzen Interaktionszeiten wird lokal eine hohe Energiemenge eingetragen, welche die Mikrostruktur des Materials entscheidend beeinflusst [25]. Die hohen Temperaturgradienten und Abkühlraten erzeugen lokale Spannungen im Material, die Ursache für Rissbildungen, Verformungen oder Delaminationen sein können. Weitere Ursachen für thermisch provozierte Spannungen können aus der gewählten Bauteilgeometrie und Belichtungsreihenfolge hervorgehen, da lokale Bereiche stärker erwärmt werden oder langsame Abkühlvorgänge stattfinden. Die Folge sind plastische Verformungen der Bauteile, die möglicherweise zu unzulässigen Toleranzen führen können [5, 6].

2.1.4 Defekte

Beim selektiven Laserstrahlschmelzen treten spezifische Materialdefekte auf, die aufgrund der schichtweisen Fertigung und insbesondere durch die lokalen thermischen Schmelzvorgänge verursacht werden. Dabei wird die Defektbildung durch die genannten Störeinflüsse verstärkt. Für die Weiterentwicklung der LSP-Technologie auf diesem Gebiet beschränkt sich in dieser Arbeit die Betrachtung der Defekte auf die nachfolgenden zwei Kategorien.

a) Rauheit

Die Oberflächenqualität der gefertigten Bauteile wird durch den Pulverwerkstoff, die Fertigungsparameter und die lokale geometrieabhängige Aufschmelzung des Materials bestimmt. Dabei verursacht die linienförmige Belichtungsstrategie eine spezifische Oberflächentopografie mit Werten für die Rauheit im Bereich von etwa $R_a = 15 \mu\text{m}$ [35].

Die geometrischen Merkmale einer gefertigten Einzelspur resultieren aus der Höhe und Breite des Schmelzbads. Diese wiederum sind von der Oberflächenspannung und Ausbreitung der Schmelze abhängig, die durch den Druck in den Schmelzetröpfchen, die Kapillarkräfte, die Benetzung und vor allem den Marangoni-Effekt beeinflusst werden [36]. In diesem Zusammenhang wird eine flache Oberflächentopografie erreicht, wenn eine abnehmende Oberflächenspannung bei steigender Temperatur entsteht, da diese zu einem radialen Ausfließen der Schmelze und somit zu einem breiteren und niedrigeren Schmelzbad führt [37].

Die verwendeten Fertigungsparameter haben entscheidenden Einfluss auf die Entstehung von höheren Rauheiten:

- Bei einer hohen **Volumenenergiedichte** V_{ED} (hohe Laserleistung, langsame Scangeschwindigkeit) erhöht sich der Tröpfchendruck. Einzelne Partikel spritzen aus der Schmelze heraus und erzeugen Unebenheiten in einer Schicht [36].
- Eine verringerte **Laserleistung** P_L wirkt sich negativ auf die Oberflächenspannung der Schmelze aus [29]. Die Folge ist eine unvollständige Verschmelzung mit der unterliegenden Schicht, sodass sich das Schmelzbad in Einzelsegmente aufspaltet und der sogenannte „Balling“-Effekt auftritt (Abbildung 2.3 links). Beispielsweise verwenden Hötter et al. [28] in ihrer Studie die maximale Laserleistung von 100 W der Anlage (SLM 50,Realizer), um eine annähernd vollständige Einzelspur zu fertigen. Jedoch erreichen sie keine absolute Reproduzierbarkeit und Gleichmäßigkeit, da die Schmelzbadausbildung zusätzlich von der Pulverkorngrößenverteilung und geringen thermische Wärmeleitfähigkeit des Pulvers beeinflusst wird (Abbildung 2.3).
- Bei schnellen **Scangeschwindigkeiten** v_s werden grobe Pulverpartikel nur teilweise aufgeschmolzen und verbleiben im Material [35]. Aufgrund des verringerten Energieeintrags werden die Schmelzbahnen schmalere und spalten sich auf [28]. Es entstehen Bindefehler und Poren [7].
- Bei großen **Schichtdicken** D_S werden während der Aufschmelzung große Schmelzzonen hervorgerufen. Gemäß dem Mahagoni-Effekt entstehen schmale, tiefe Schmelzbäder, die zu größeren Strukturen in der Oberfläche führen [37, 38].
- Bei Bauteilen mit großen Flächenwinkeln wird die Qualität der Außenkonturen durch den Treppenstufeneffekt beeinflusst. Große **Schichtdicken** D_S begünstigen den Stufeneffekt aufeinander folgender Schichten und erzeugen größere Oberflächenstrukturen [36].
- Sind die **Spurabstände** Δy_S größer als die Einzelspurbreite, bilden sich Lücken zwischen den Schmelzbahnen. Das dazwischen liegende Pulver wird nicht aufgeschmolzen, wodurch eine erhöhte Pulverschichtdicke für darauffolgende Belichtungen entsteht.

Weitere Ursachen für raue Oberflächen sind:

- Durch eine ungeeignete geometrische Auslegung der Bauteile wird die Wärmeableitung verschlechtert. Dadurch werden umliegende Pulverpartikel angeschmolzen und die Unebenheiten erhöht [34, 39].
- Bereits vorhandene Gaseinschlüsse dehnen sich bei erneuter Belichtung aus, verdrängen das umliegende flüssige Material und steigern demzufolge die Inhomogenität in der Oberfläche [40].

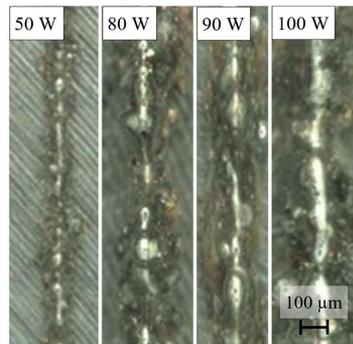


Abbildung 2.3: Einzelspuren im Laserstrahlschmelzen bei verschiedenen Laserleistungen P_L (aus [28]).

Die Auflistung der verschiedenen Einflussfaktoren zeigt, dass eine angepasste Parametereinstellung und Kontinuität der Volumenenergiedichte V_{ED} notwendig ist, um hohe Rauheiten zu vermeiden. Treten ungewollte Oberflächentopografien auf, können die Erhöhungen im Oberflächenprofil mit dem Beschichtersystem kollidieren und zu mechanischen Verformungen des Bauteils führen. Gleichzeitig kann eine höhere Rauheit eine inhomogene Pulververteilung verursachen und die darauffolgenden Belichtungsprozesse beeinflussen. Zudem begünstigt eine erhöhte Rauheit die Porenbildung in den anschließenden Prozessschritten, wie im nachfolgenden Abschnitt erläutert wird.

b) Porosität

Aufgrund des komplexen Aufschmelzvorgangs entstehen selbst bei nahezu idealen Fertigungsbedingungen Hohlräume (Abbildung 2.4) und Poren im Material, weswegen die Bauteile eine geringe Porosität bzw. eine Dichte von bis zu 99,9 % aufweisen können [41]. Dabei verschlechtern die eingeschlossenen Hohlräume die Wärmeleitfähigkeit des Materials [42, 43], reduzieren die Festigkeit durch Kerbwirkungen und verringern das Gesamtgewicht [23].

Die Entstehung von Hohlräumen und Poren wird in DIN 65123 [44] detailliert erläutert, in der auch weitere Materialdefekte im Laserstrahlschmelzen klassifiziert werden. Zum weiteren Verständnis wird in dieser Arbeit bezüglich der Defekte „Hohlraum“ und „Poren“ das Hohlraumvolumen auf das Gesamtvolumen des Bauteils betrachtet und mit dem Begriff Porosität beschrieben. Dabei handelt es sich um eine geschlossene Porosität mit nicht verbundenen Poren.

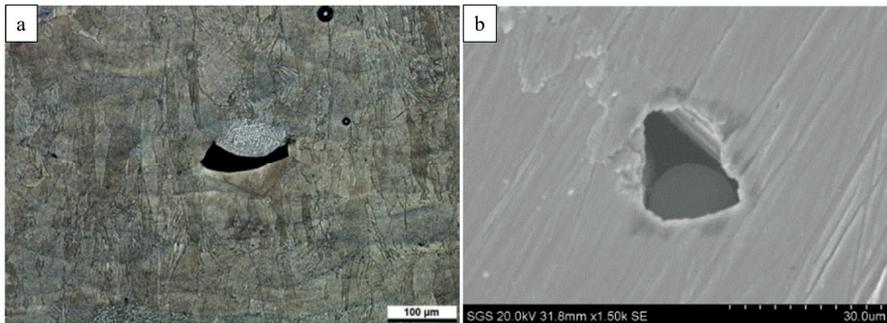


Abbildung 2.4: Hohlraum aufgrund fehlerhaften Lagenaufbaus in Titan 6ALV4 (a); nicht geschmolzenes Pulver im Hohlraum (b) (aus [44]).

Folgende Ursachen und Wechselwirkungen begünstigen die Defektbildung und erhöhen die Gesamtporosität des Materials:

- Eine zu niedrige **Volumenenergiedichte** V_{ED} durch zu hohe **Scangeschwindigkeiten** v_s [26] oder zu niedrige **Laserleistungen** P_L [45] kann eine unzureichende Pulveraufschnelzung hervorrufen, wodurch sich die Schmelzbadgröße verringert und diskontinuierliche Schmelzbahnen entstehen. Lokale Bereiche oder einzelne Lagen sind unvollständig aufgeschmolzen. Die Folge sind Hohlräume (Abbildung 2.4a) innerhalb oder zwischen den Lagen, die Größen bis zu 200 µm aufweisen können [25, 46].
- Ebenso können eine ungeeignete Belichtungsstrategie oder eine unzureichende Überlappung der Schmelzbahnen durch zu hohe **Spurabstände** Δy_s [47] Ursachen für eine Hohlraumbildung sein [44].
- Eine zu hohe **Volumenenergiedichte** V_{ED} führt zu einer übermäßig großen Oberflächenspannung [48], die sphärische Hohlräume im Material [46] und eine höhere Porosität verursacht [45].
- Ein fehlerhafter **Lagenaufbau** oder **ungleichmäßiger Pulverauftrag** führen zu Pulveranhäufungen, sodass Hohlräume bis zu 500 µm [25] zwischen den Schichten auftreten können. Gleichzeitig können nicht geschmolzene Pulverteilchen (Abbildung 2.4b) im Material verbleiben und längliche und rissartige Hohlräume ausbilden [46].
- Eine bereits **raue Oberfläche** begünstigt die Hohlraumbildung, da die Erhöhungen im Profil eine nachfolgende gleichmäßige Pulverteilung stören. Die Pulveranhäufungen in den Tälern des Oberflächenprofils erhöhen die lokale Pulverschichtdicke, sodass die eingetragene Laserenergie nicht zur Aufschmelzung ausreicht [49, 50]. Die Hohlräume bilden sich insbesondere an der Grenzfläche zwischen aufeinander folgenden Schichten aus und haben eine Größe von 10 - 50 µm [51].

- Im Laserstrahlschmelzen werden Gaseinschlüsse im Material als „Pore“ bezeichnet. Da das Pulverbett aufgrund der Pulververteilung zu etwa 50 % porös ist, befindet sich Schutzgas zwischen den Partikeln, das sich während der Belichtung im Schmelzbad auflöst. Infolge zu hoher **Abkühlgeschwindigkeiten** verbleibt vorhandenes Gas nach der Erstarrung im Material und führt zu Poren. In diesem Zusammenhang wird die Anhäufung des Gases in der Schmelze durch die hohe Schmelzbadtemperatur begünstigt [52]. Die Poren können in einer kugeligen oder oval langgezogenen Form auftreten, die bei Anhäufung als linienartige Porenketten erscheinen [44].
- Die **Scanrichtung** und **Lagenanordnung** beeinflussen die Ausrichtung und Größe der Poren [25].
- Durch die Vermischung diverser **Pulversorten** liegen im Ausgangsmaterial unerwartete Fremdkörper mit beispielsweise höherer Schmelztemperatur vor, die nach der Schmelze im Material verbleiben und die Porosität beeinflussen [44].

2.1.5 Prozessüberwachung

Nach VDI-Richtlinie 3405 [4] ist eine regelmäßige Dokumentation des Prozesses durch die Herstellung von Prüfkörpern erforderlich. Zur Überprüfung der äußeren geometrischen Merkmale können die Bauteile nach der Entnahme taktil oder optisch geprüft werden. Aufgrund des lagenweisen Aufbaus werden aber temporär auftretende Defekte innerhalb des Bauteils in den nachfolgenden Prozessschritten durch die nächste Pulverschicht oder neue Lage verdeckt. Somit sind solche Defekte nicht an der Oberfläche erkennbar, weshalb mögliche Prozessschwankungen und damit das Auftreten von Fehlern unbemerkt bleiben [14]. Zu diesem Zweck können Qualitätsprüfungen, wie die Computertomographie oder Ultraschallprüfung, durchgeführt werden, um innenliegende Fehler bei fertigen Bauteilen zu detektieren. Jedoch erweisen sich diese nachträglichen und z.T. zerstörenden Prüfungen als nicht wirtschaftlich, da sie zeit- und kostenaufwendig sind und zusätzliche Ressourcen verbrauchen [4].

Somit ist eine frühzeitige Defekterkennung während der Fertigung hilfreich, um die aktuelle Bauteilqualität und Prozessstabilität zu bewerten. Dadurch kann der laufende Prozess bei erkannten Fehlern korrigiert, abgebrochen oder neu gestartet und die Wirtschaftlichkeit der Fertigung erhöht werden [15].

Aufgrund dessen wurden verschiedene Lösungen zur Prozess- oder Bauteilüberwachung für das Laserstrahlschmelzverfahren entwickelt, die in Tabelle 2.2 zusammengefasst sind. Des Weiteren geben Everton et al. [53] einen Überblick über bisherige Forschungsarbeiten zu ausgewählten Überwachungssystemen im Bereich der metallischen additiven Fertigung.

Tabelle 2.2: Übersicht bisheriger Forschungsansätze zur Prozessüberwachung im Laserstrahlschmelzen.

Methoden	Kurzbeschreibung	Quellen
Pyrometrie	Überwachung der Wärmestrahlung in der Schmelzbadzone zur Temperaturermittlung	[14-18]
Thermographie	Untersuchung der Temperaturverteilung mithilfe von Infrarot- (IR) Kameras und Bolometern	[42, 54, 55]
Meltpool-Monitoring	Untersuchung der Schmelzbadstrahlung und -ausbreitung mit Photodioden und IR-Kameras	[8-10, 56]
Hochauflösende Bildüberwachung	Hochauflösende Bildaufnahmen während des Prozesses zur Defekterkennung an der Oberfläche	[11-13]
Zustandsüberwachung	Piezoelektrischer Beschleunigungssensor zur Erkennung herausstehender Bauteilkanten und Messung von Schwingungen während des Pulverauftrags	[57, 58]
Ultraschall	Untersuchung der Ultraschallverhaltens während des Aufbaus zur Detektion von Defekten, wie Poren	[59]
Optische Tomographie	Schichtweise optische Untersuchung der Bauteiloberfläche anhand der Wärmestrahlung	[55, 60, 61]

Im Wohlers Report 2019 [22] werden bereits eingesetzte Prüfsysteme verschiedener Anlagenhersteller (EOS, SLM Solutions oder GE Additive) vorgestellt. Sie umfassen die Methoden der Schmelzbadanalyse (Meltpool-Monitoring), die Temperaturüberwachung und Systeme zur Dokumentation von Statusinformationen im Prozess.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Pyrometrie und das Meltpool-Monitoring näher erläutert, da insbesondere die Ansätze der Temperaturmessung mit einem Pyrometer in dieser Arbeit mit den Ergebnissen der LSP verglichen werden. Diese optischen Methoden messen die Wärmestrahlung des Schmelzbads, um die Qualität des Aufschmelzprozesses zu ermitteln. Darüber hinaus wird die hochauflösende Bildüberwachung vorgestellt. Mit dieser Methode werden die Schmelzbahnen und die aktuelle Oberfläche im Prozess untersucht, um die Oberflächentopologie und geometrische Abweichungen zu bewerten.

a) Pyrometrie

Die Temperatur des Schmelzbads ist ein Indikator für die thermischen Wechselwirkungen im Material beim Laserstrahlschmelzen. Dabei verursachen Defekte, wie Poren, während des thermischen Energieeintrags eine ungleichmäßige Temperaturverteilung, die an der Oberfläche gemessen werden kann [62]. Aufgrund dessen verwenden Pavlov [14] und Doubenskaia [17, 18] Pyrometer zur berührungslosen Temperaturmessung im Laserstrahlschmelzverfahren, um anhand der emittierenden Wärmestrahlung (siehe Abschnitt 2.3.1) der Schmelzbahnen die aktuelle Prozessstabilität zu bewerten.

Im Schmelzvorgang treten je nach Werkstoff Temperaturen zwischen 900 und 2900 K auf, sodass IR-Strahlung insbesondere in einem Wellenlängenbereich zwischen 1,25 - 1,4 μm emittiert wird.

Allerdings konnten mit den Pyrometern keine genauen Temperaturwerte beim Laserstrahlschmelzverfahren angegeben werden. Die Ursache ist eine erschwerte Kalibration zu einem idealen schwarzen Referenzkörper während der Fertigung. Da das pyrometrische System in einem off-axis-Aufbau (nicht-axial) außerhalb der Anlage positioniert ist, wird die Kalibration durch die Reflexion des Sichtfensters beeinträchtigt. Zudem ist die Messung aufgrund der rauen Umgebungsbedingungen mit umherfliegenden Pulverpartikeln und Schmauchbildung in der Baukammer erschwert. Somit treten Messunsicherheiten auf und eine exakte Kalibration ist nicht möglich [18].

Ein weiterer Nachteil ist neben der Angabe der Messdaten in eigenen Pyrometereinheiten die eingeschränkte Auflösung der Messsignale durch die begrenzte Aufnahme­frequenz von 20 Hz. Darüber hinaus beträgt die gesamte Betrachtungszone des Pyrometers lediglich 560 μm im Durchmesser (Abbildung 2.5, Gebiet (2)). Dadurch wird die Fläche des Belichtungslaserspots (Durchmesser 70 μm , Abbildung 2.5 (1)) und die resultierende Schmelzbahn abgedeckt [14]. Jedoch ist die Information durch die definierte Position des Pyrometers lokal eingeschränkt, womit nur ein kleiner Teil des Bauteils untersucht werden kann.

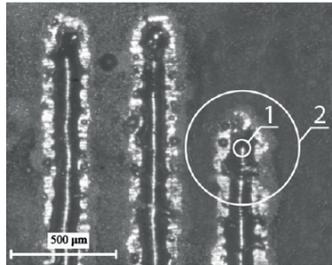


Abbildung 2.5: Untersuchungsbereich einer Schmelzbahn mit Pyrometer; Laserstrahldurchmesser des Belichtungslasers (Gebiet 1) und Pyrometerbetrachtungsfeld (Gebiet 2) (aus [14]).

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen allerdings, dass das Pyrometersignal weitgehend proportional zu den verwendeten Fertigungsparametern, wie Scangeschwindigkeit v_s , Spurabstand Δy_s und Pulverschichtdicke D_s , ist [14].

Grundsätzlich wurden bei größeren Schichtdicken größere Pyrometersignale und demnach höhere Temperaturen ermittelt, da die Wärmeleitfähigkeit im Pulverbett mit steigendem Pulveranteil sinkt. Bei geringen Schichthöhen findet eine gute Wärmeleitung in das Bauteil und die Substratplatte statt, weshalb ein geringerer Temperaturgradient gemessen wurde [17]. Aufgrund der hohen Messunsicherheiten konnten aber weder die resultierende Wärmestrahlung noch die Temperatur im Prozess präzise bestimmt werden.