



Holger Hermann Merschroth

**Entwicklung eines Vorgehens zur Bewertung  
der lokalen Erstarrungsbedingungen mittels  
Hochgeschwindigkeitskamera für das  
Pulverbettsschmelzen mit Laserstrahl**

**Schriftenreihe des PTW  
„Innovation Fertigungstechnik“**

Herausgeber  
Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele  
Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich  
Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold

Entwicklung eines Vorgehens zur Bewertung der lokalen  
Erstarrungsbedingungen mittels Hochgeschwindigkeitskamera für das  
Pulverbettsschmelzen mit Laserstrahl

Vom Fachbereich Maschinenbau  
an der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs  
(Dr.-Ing.)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

**Holger Hermann Merschroth, M.Sc.**

aus Heppenheim

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner

Tag der Einreichung: 28.11.2022

Tag der mündlichen Prüfung: 08.02.2023

Darmstadt 2022

D17



Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik"

**Holger Hermann Merschroth**

**Entwicklung eines Vorgehens zur Bewertung  
der lokalen Erstarrungsbedingungen mittels  
Hochgeschwindigkeitskamera für das  
Pulverbettsschmelzen mit Laserstrahl**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag  
Düren 2023

### **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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2023

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9086-4

ISSN 1864-2179

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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort des Herausgebers**

Additive Fertigungsverfahren werden branchenübergreifend in der Kleinserienfertigung genutzt, wobei das laserbasierte Pulverbettsschmelzen (PBF-LB) metallischer Werkstoffe im Fokus der industriellen Anwendung steht. Während die Qualität sicherheitskritischer Bauteile derzeit durch zeit- und kostenintensive Prüfverfahren sichergestellt werden (u.a. Computertomografie), bietet der schichtweise Aufbau der Bauteile, kombiniert mit prozessparallelen Überwachungssystemen das Potential der direkten Qualitätsbewertung. Bisher entwickelte Ansätze fokussieren die Erkennung von Prozessanomalien als Indikator für potenzielle Defekte. Die Bewertung der Schmelzbaderstarrung als maßgebliche Ursache für die resultierende Mikrostruktur stellt aktuell eine Forschungslücke dar.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein Prozessüberwachungskonzept zu entwickeln, das die lokale Bewertung der Erstarrung und folgend eine Abschätzung der Mikrostruktur ermöglicht. Hierfür wird eine on-axis Hochgeschwindigkeitskamera genutzt, welche die Prozesszone um das Schmelzbad detektiert. Basierend auf charakteristischen Intensitätswerten, welche die Phasenübergänge fest-flüssig und flüssig-gasförmig beschreiben, wird die Erstarrungslänge in Scanvektorrichtung ermittelt. Durch die bekannten Temperaturen der Phasenübergänge wird zudem der Temperaturgradient bestimmt. Die Einflüsse von Prozessparametern, der Position auf der Bauplattform sowie der Scanvektorrichtung werden in die Auswertung einbezogen und somit statistisch signifikante Einflussgrößen auf die Schmelzbaderkennung berücksichtigt. Abschließend wird ein lineares Regressionsmodell, mit den Erstarrungsbedingungen als Eingangsgrößen, zur Abschätzung des mittleren Korndurchmessers entlang der Schmelzbahn entwickelt.

Das entwickelte Vorgehen eröffnet neue Möglichkeiten in der Bewertung von Erstarrungsbedingungen und den lokalen Mikrostruktureigenschaften, welche die industriellen Herausforderungen in der Qualitätssicherung durch prozessparallele Überwachungssysteme und der Prozesszertifizierung adressieren.



## **Vorwort des Verfassers**

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der TU Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Matthias Weigold für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit und das mir entgegengebrachte Vertrauen. Herrn Professor Dr.-Ing. Matthias Oechsner danke ich für die Übernahme des Koreferats und für die gute Zusammenarbeit im Rahmen des Additive Manufacturing Centers.

Die Inhalte dieser Arbeit entstanden im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderten Projekts AddLight. Ein großer Dank gilt Johannes Geis, Michael Krämer und Marcus Klein für die offene Zusammenarbeit sowie die große Unterstützung. Herrn Dr. Thomas Grünberger danke ich für die freundschaftliche und fachliche Unterstützung.

Ich danke allen Kolleginnen und Kollegen am PTW, mit denen ich im Laufe meiner Institutszeit zusammengearbeitet habe. Ein großer Dank gilt Dr.-Ing. Jakob Fischer und Dr.-Ing. Michael Kniepkamp, die mich fachlich und freundschaftlich stets unterstützt haben. Stellvertretend für das Support-Team und die mechanische Werkstatt bedanke ich mich bei Annette Heb, Boris Prinzisky, Alexander Rühl, Kamelia Kletti und Mirko Feick.

Für die offenen Diskussionen und die unterhaltsamen Erlebnisse danke ich Martin Link.

Meiner Familie, vor allem meinen Eltern Klaus und Sabine und meinen Geschwistern Philipp und Marlen möchte ich von ganzem Herzen danken. Ihr habt mich immer unterstützt und mir somit in jeder Lebensphase den Rücken gestärkt.

Mein größter Dank gilt dir, Marie, für die andauernde Unterstützung, dein Verständnis und deine Liebe.

Pfungstadt, im März 2023

Holger Merschroth





## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>XII</b>
<b>Abkürzungs- und Formelverzeichnis .....</b>	<b>XIII</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen und Stand der Technik .....</b>	<b>5</b>
2.1 Additive Fertigungsprozesse .....	5
2.2 Laserbasiertes Pulverbettsschmelzen .....	8
2.2.1 Verfahren .....	10
2.2.2 Prozessparameter und Einflussgrößen .....	14
2.2.3 Physikalische Grundlagen des Schmelzbades .....	19
2.2.4 Mikrostrukturausprägung und resultierende mechanische Eigenschaften .....	23
2.3 Werkstoff 1.4404 .....	27
2.3.1 Prozessierbarkeit .....	27
2.3.2 Gefügeausprägung .....	28
2.4 Prozessüberwachung .....	31
2.4.1 Klassifizierung von optischen Prozessüberwachungssystemen ...	33
2.4.2 Optische Prozessüberwachung des Schmelzbades .....	34
2.4.3 Korrelation mit Materialeigenschaften .....	37
<b>3 Motivation, Zielsetzung und Vorgehensweise .....</b>	<b>39</b>
<b>4 Versuchseinrichtungen, Rand- und Einsatzbedingungen .....</b>	<b>43</b>
4.1 Fertigungseinrichtung .....	43
4.2 Werkstoff .....	44
4.3 Prozessüberwachungssysteme .....	45
4.3.1 EOSTATE MeltPool .....	46
4.3.2 Hochgeschwindigkeitskamera plasmEye .....	47

---

<b>5 Untersuchungen zur Bewertung der Schmelzbaderstarrung mittels Hochgeschwindigkeitskamera.....</b>	<b>49</b>
5.1 Schmelzbadcharakterisierung basierend auf der Umhüllenden.....	50
5.1.1 Versuchsplan .....	50
5.1.2 Algorithmus und Randbedingungen .....	50
5.1.3 Messtechnische Kalibrierung der Schmelzbaderkennung .....	53
5.2 Erweiterung der Schmelzbadcharakterisierung zur Beschreibung der dynamischen Schmelzbadentwicklung .....	57
5.2.1 Versuchsplan .....	57
5.2.2 Algorithmus und Randbedingungen .....	59
5.2.3 Messtechnische Kalibrierung der erweiterten Schmelzbaderkennung .....	66
5.2.4 Einfluss der Prozessparameter und -randbedingungen auf die Schmelzbaderkennung .....	68
5.3 Ermittlung der Erstarrungslänge .....	83
5.4 Zwischenfazit .....	86
<b>6 Ermittlung des Temperaturgradienten und der Erstarrungsgeschwindigkeit.....</b>	<b>89</b>
6.1 Temperaturgradient .....	89
6.2 Erstarrungsgeschwindigkeit .....	92
6.3 Zwischenfazit .....	96
<b>7 Auswertung der Mikrostruktureigenschaften .....</b>	<b>97</b>
7.1 Methodisches Vorgehen .....	97
7.2 Ergebnisse der Mikrostrukturauswertung.....	99
7.3 Zwischenfazit .....	103
<b>8 Datengetriebene Bewertung des Prozesses .....</b>	<b>105</b>
8.1 Bewertung des Prozesses über die Schmelzbaderstarrung .....	105
8.2 Korrelation von Mikrostruktur und Erstarrungsgrößen .....	108
8.3 Zwischenfazit .....	115

---

<b>9 Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>117</b>
9.1 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....	117
9.2 Identifikation offener Fragestellungen .....	121
9.3 Ansätze zur Nutzung in wissenschaftlichen und industriellen Fragestellungen .....	124
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>127</b>
<b>Veröffentlichungen .....</b>	<b>153</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>155</b>
A. Qualitativer Vergleich des geschätzten und des wahren Korndurchmessers .....	155