

**Additive Fertigung von Ti-6Al-4V im selektiven  
Laserstrahlschmelzverfahren unter XHV-adäquater  
Atmosphäre**

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieurin  
Dr.-Ing.  
genehmigte Dissertation

von

M. Sc. Nicole Emminghaus

2024

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Stefan Kaieler
  2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Hans Jürgen Maier
  3. Referent: Prof. Dr.-Ing. Stephan Kabelac
- Tag der Promotion: 27.03.2024

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Laser Zentrum Hannover e. V. (LZH). Die Untersuchungen wurden im Rahmen des durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereichs SFB 1368 „Sauerstofffreie Produktion“ (Projektnummer 394563137) durchgeführt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Kaieler, geschäftsführender Vorstand des LZH, gilt mein besonderer Dank für die vertrauensvolle und wohlwollende Unterstützung, die ich während meiner Tätigkeit am Institut erfahren habe. Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans Jürgen Maier danke ich für die Übernahme des Zweitreferats. Weiterhin gilt mein Dank Herrn Prof. Stephan Kabelac für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Bedanken möchte ich mich ebenso bei meinen Arbeitskollegen und -kolleginnen am LZH und im SFB 1368 für die Zusammenarbeit und die zahlreichen fachlichen Diskussionen. Insbesondere möchte ich mich bei Frau Tatjana Melnyk für die Anfertigung der REM-, CT- und EDX-Aufnahmen und bei Frau Linda Krüger für die metallographische Unterstützung bedanken. Herrn Hannes Büttner, Herrn Jannes August und Herrn Michael Huse danke ich für ihren unermüdlichen Einsatz und ihre Unterstützung beim Aufbau und der Inbetriebnahme der Laboranlage. Herrn Khemais Barienti danke ich für die Unterstützung mittels XRD-Messungen und Herrn Maik Szafarska für seine Hilfe bei der Nanopartikelcharakterisierung mittels EDX. Besonderer Dank gilt Herrn Jörg Hermsdorf, Herrn Robert Bernhard und Herrn Tjorben Griemsmann für die kritische Durchsicht dieser Arbeit, die praktischen Ratschläge und die konstruktiven Diskussionen.

Abschließend danke ich meiner Familie für die Unterstützung auf dem Weg zur Promotion und meinem Partner Max für die Geduld, das Verständnis und die bedingungslose Unterstützung.

## Kurzzusammenfassung

Sauerstoff stellt im selektiven Laserstrahlschmelzen von Metallen einen Störfaktor dar, der zu einer Degradation der Bauteil- und Pulvereigenschaften führt, insbesondere bei reaktiven Werkstoffen wie der Titanlegierung Ti-6Al-4V. Ein innovativer Ansatz zur Eliminierung des atmosphärischen Restsauerstoffs ist die Zugabe geringer Mengen des reaktiven Gases Monosilan zur Argon-Prozessatmosphäre. Hierdurch ist ein Restsauerstoffgehalt adäquat zu dem in einem extrem hohen Vakuum (XHV) bei Beibehaltung des atmosphärischen Drucks erreichbar. In dieser Arbeit wird das selektive Laserstrahlschmelzen von Ti-6Al-4V erstmalig unter einer solchen sauerstofffreien Atmosphäre durchgeführt. Durch die Aufstellung von Prozessmodellen nach der Response-Surface-Methodik wird der Einfluss der Atmosphäre auf das Prozessfenster und die Bauteilqualität untersucht. Basierend auf einer ermittelten Prozessparameterkombination für hohe Bauteilqualität werden aufbauende Untersuchungen zur Charakterisierung der Bauteileigenschaften und des Prozessverhaltens durchgeführt. Mittels einer koaxialen Hochgeschwindigkeitskamera und eines entwickelten Auswerteskripts unter Verwendung computergestützter Bildverarbeitung wird das Schmelzbad- und Spritzerverhalten analysiert. Es zeigt sich, dass die Verwendung der XHV-adäquaten Atmosphäre die Bauteileigenschaften nicht signifikant beeinflusst. Sie führt jedoch zu einer Verringerung von Spritzeranzahl und -oxidation und kann somit einen wichtigen Beitrag dazu leisten, die Pulverdegradation zu vermindern und die Ressourceneffizienz sowie Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zu steigern.

Schlagwörter: Selektives Laserstrahlschmelzen, Ti-6Al-4V, sauerstofffreie Produktion

## Abstract

### **Additive manufacturing of Ti-6Al-4V by laser powder bed fusion under an XHV-adequate atmosphere**

In laser powder bed fusion of metals, oxygen is a detrimental factor leading to degradation of the part and powder properties, in particular for reactive materials such as the titanium alloy Ti-6Al-4V. An innovative approach to eliminating residual atmospheric oxygen is to add small amounts of the reactive gas monosilane to the argon process atmosphere. As a result, a residual oxygen content adequate to an extremely high vacuum (XHV) can be achieved while maintaining atmospheric pressure. For the first time, the laser powder bed fusion process of Ti-6Al-4V is being carried out in such an oxygen-free atmosphere. The influence of the atmosphere on the process window and the part quality is examined by setting up process models based on the response surface method. With a determined combination of process parameters for high part quality, further investigations are carried out to characterize the part properties and the process behavior. The melt pool and spatter behavior is analyzed using a coaxial high-speed camera and a developed evaluation script using computer vision. It turns out that the use of the XHV-adequate atmosphere does not significantly affect the part properties. However, it leads to a reduction in the number of spatters and spatter oxidation and can therefore make an important contribution to reducing powder degradation, increasing resource efficiency and cost-effectiveness of the process.

Keywords: laser powder bed fusion, Ti-6Al-4V, oxygen-free production