

# Einfluss organischer Fremdstoffe in additiv gefertigtem Ti-6Al-4V

Kerstin Winkler<sup>1</sup>, Husam Ahmad<sup>2</sup>, Andre Danzig<sup>3</sup>, Philipp Gloetter<sup>3</sup>, Frank Schubert<sup>1</sup>,  
Guntram Wagner<sup>2</sup>, Lothar Kroll<sup>1</sup>

<sup>1</sup>TU Chemnitz, Institut für Strukturleichtbau, Chemnitz, Deutschland

<sup>2</sup>TU Chemnitz, Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik, Chemnitz; Deutschland

<sup>3</sup>Liebherr-Aerospace Lindenberg GmbH, Lindenberg, Deutschland

## Kurzfassung

*Das Selektive Laserschmelzen ist einer der vielen pulverbettbasierten Fertigungsverfahren, die in vielen Industriebereichen ihren Einsatz findet. Vorallem in der Luftfahrtbranche werden vermehrt Bauteile aus Titanlegierungen mit diesem Verfahren hergestellt. Hohe Sicherheitsanforderungen zwingen daher, die Pulverqualität stets zu gewährleisten, weswegen die Auswirkungen bei Verunreinigungen in diesem Beitrag Untersuchungsgegenstand waren.*

*Selective laser melting is one of the many Laser Powder Bed Fusion manufacturing processes (LPBF) used in many industrial sectors. Especially in the aerospace industry, components made of titanium alloys are increasingly produced with this process. High safety requirements therefore force the powder quality to be guaranteed at all times, which is why the effects of impurities were the subject of investigation in this article.*

## 1 Einleitung

Die additive Fertigung (AM) hat in den letzten Jahren in vielen Branchen an Bedeutung gewonnen. Eine der führenden Branchen auf dem weltweiten AM-Markt ist die Luft- und Raumfahrtindustrie seit 2015. Mit einer geschätzten jährlichen Wachstumsrate von 1,6% gehörte sie 2016 zu den am schnellsten wachsenden Branchen, mit AM-Umsätzen von 6,7 Milliarden US-Dollar. Es wird erwartet, dass die Umsätze bis 2023 auf das Dreifache ansteigen [1]. Die Luft- und Raumfahrtindustrie zeigt großes Interesse an den vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten von AM. In der herkömmlichen Fertigung stellen hochkomplexe Geometrien mit integrierten Funktionen, dünnwandige Strukturen, lange Vorlaufzeiten und ein niedriges Verhältnis von Entwicklung zu Produktion eine Herausforderung dar [2]. In den meisten Fällen handelt es sich zudem um kleine Losgrößen, die an spezifische Anwendungen und Kunden angepasst werden müssen. Die Luft- und Raumfahrtindustrie profitiert von AM, bei dem die Bauteile ohne Werkzeuge oder Formen hergestellt werden und dies kostengünstig und zeitsparend geschieht [3]. Insbesondere Materialien, die für die Luft- und Raumfahrt relevant sind, wie teure Titanlegierungen, werden hier verwendet. Titanlegierungen vereinen hohe mechanische Eigenschaften und sehr gute Korrosionsbeständigkeit bei vergleichsweise geringem Gewicht [4].

Einer der vielen Prozesse, die sich für die additive Verarbeitung von Metalllegierungen eignen, ist das Selektive Laserschmelzen (SLM). Dies fällt unter die Kategorie des Laserschmelzens von Metallpulver auf einer Bettoberfläche (Pulverbettaufschmelzen für Metalle, PBF-LB/M) [5]. In diesem Prozess wird eine dünne Schicht Metallpulver auf einer Plattform aufgetragen, ein Laser verschmilzt

die Metallpartikel und die Plattform wird um die festgelegte Schichthöhe abgesenkt. Anschließend wird erneut Pulver aufgetragen. Dieser Vorgang wiederholt sich, bis die gewünschte Bauteilhöhe erreicht ist [6]. Bevor jedoch ein neuer Prozess wie SLM in eine bestehende Produktionskette integriert werden kann, müssen zunächst die spezifischen Anforderungen der Luftfahrt erfüllt werden. In dieser Hinsicht müssen hohe Standards für die Qualität, Qualifikation und Zertifizierung von Luft- und Raumfahrtkomponenten, speziell für die additive Fertigung, festgelegt werden. Dies betrifft die gesamte additive Fertigungskette [7] [8]. In diesem Kontext sollte besonderes Augenmerk auf die Pulverhandhabung gelegt werden, beispielsweise hinsichtlich möglicher Kontaminationsquellen vor und während der Bauteilherstellung. DIN SPEC 17071 beschreibt die Anforderungen an das Ausgangsmaterial, zu denen die Vermeidung von Kreuzkontaminationen mit der Umgebung gehört. Es muss darauf geachtet werden, einen geschlossenen Pulverkreislauf sicherzustellen [9]. Allerdings können verschiedene Schritte in der Pulverhandhabung, wie manuelle Schritte unter Umgebungsbedingungen, Auswirkungen auf das Material haben. Diese reichen von Transport und Lagerung bis hin zu Trocknung, Entfernung aus der Baukammer und Wiederverwendung des Pulvers. Diese bergen potenzielle Risiken und somit Konsequenzen für das Pulvermaterial, wie Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung aufgrund des Eintrags von Fremdpartikeln [10].

Um den Einfluss von Fremdpartikeln auf das Titanmaterial genauer zu untersuchen, wurden organische Fremdpartikel analysiert und priorisiert, die entlang der Pulverprozesskette auftreten können. Die priorisierten

Fremdpartikel wurden in Ti-6Al-4V-Proben im SLM-Prozess unter Ausschluss der Atmosphäre eingebracht, um eine Veränderung in der Mikrostruktur der gedruckten Legierung festzustellen. Hierzu wurden Längsschliffe (parallel zur Baurichtung) der im SLM gedruckten Würfel vorbereitet und unter Verwendung von Lichtmikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie (REM) mit verschiedenen Detektoren (Rückstreuielektronen, In-Lens, Sekundärelektronen) und energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) untersucht.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Ti-6Al-4V im Selektiven Laserschmelzen

Für diese Untersuchung wurde die Titanlegierung Ti-6Al-4V verwendet. Mit ihren hervorragenden Eigenschaften findet diese Legierung Anwendung in verschiedenen Branchen, wie beispielsweise der Luft- und Raumfahrt [11]. Mit einer hohen Zugfestigkeit von bis zu 1200 MPa und einer Dehnung von bis zu 16% bei einer vergleichsweise geringen Materialdichte von 4,43 g/cm<sup>3</sup> ist diese Legierung besonders geeignet für stark beanspruchte Komponenten wie Halterungen, Motorteile oder Tragflächen [3] [12] [13]. Für die Untersuchungen wurde Pulver von der Firma APC mit sphärischer Form und einer Partikelgrößenverteilung von 20-63 µm verwendet [14]. Die chemische Zusammensetzung ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Legierungszusammensetzung der Ti-6Al-4V [14]

Element	Al	V	O	Fe	C	N	Ti
Gew.-%	6,5	3,9	0,1	0,19	0,01	0,022	Bal*

Je nach Temperatur und Abkühlgeschwindigkeit können unterschiedliche Arten von Mikrostrukturen in Ti-6Al-4V-Legierungen gebildet werden, darunter bimodal, globular und lamellar. Verschiedene Wärmebehandlungen können eingesetzt werden, um die Mikrostruktur und die Materialeigenschaften anzupassen [15]. Im selektiven Laserschmelzen (SLM-Prozess) wird die Struktur aufgrund der hohen Abkühlprozesse lamellar, was auf verschiedene Prozessparameter wie die Wärmeeinbringung durch den Laser und die hohen Temperaturen zurückzuführen ist. Laut Hooper liegt die Temperatur im geschmolzenen Bad zwischen etwa 1000 und 4000 Kelvin, und die Abkühlraten liegen zwischen 1-40 K/µs [16]. Aufgrund dieser Faktoren bildet sich eine lamellare, feinnadelige Struktur, wie in Abbildung 1 dargestellt.

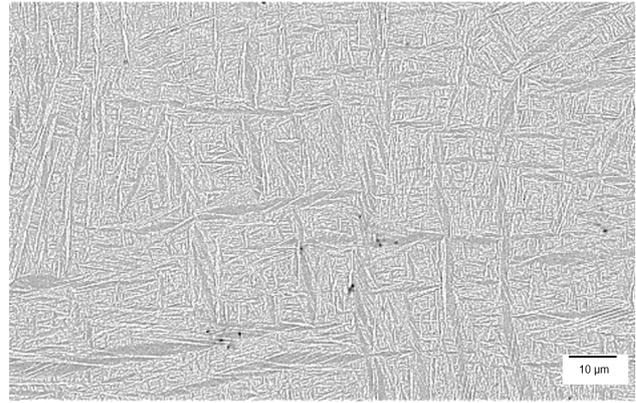


Abbildung 1: REM-Bild einer additiv hergestellten Ti-6Al-4V-Legierung. Aufgrund hoher Abkühlraten ergibt sich eine feinnadelige α-Martensit-Mikrostruktur [17].

Das Material und die Testgeometrien wurden auf der Selektiven Laserschmelzanlage MTT SLM 250 HL von SLM Solutions verarbeitet und hergestellt.

### 2.2 Fremdpartikel in der Pulverprozesskette

Zunächst wurde die Prozesskette überprüft und potenzielle Kontaminationsquellen identifiziert. Der Schwerpunkt lag darauf, welche Verunreinigungen während manueller Tätigkeiten an und um die Ausrüstung herum in das Pulvermaterial gelangen könnten. Wie bereits von Seyda [10] in einer Fehleranalyse aufgeführt, kann in jedem Schritt des Pulveraufbereitungsprozesses Verunreinigungen auftreten und eingebracht werden. Um die Kontaminationen zu qualifizieren, wurde jeder Prozessschritt an den Maschinen im Detail betrachtet. Tabelle 2 zeigt mögliche Fremdpartikel basierend auf den Anforderungen für das Materialmanagement der DIN SPEC 17071 und der Fehleranalyse von Seyda [10]. In dieser Untersuchung wurde das übliche Verhalten der Mitarbeiter\*innen an den Maschinen beobachtet und dokumentiert. Kontaminationen während der Pulverprozesskette wurden erfasst, die ein vermutetes hohes Risiko darstellen könnten.

Tabelle 2: Verwendete Beispiele für Verunreinigungen basierend auf Prozessschritten gemäß [9] und [10]

Pulverbehandlung und Reinigung des Bauraums	SLM Prozess und Umgebung	Bauteilentfernung
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abwischen mit Papiertüchern</li> <li>• Reinigen mit einer Bürste/ Verlust von Borsten</li> <li>• Rückständige Partikel in Ecken/ Spalten</li> <li>• Rückständige Partikel im Beschichtungssystem</li> <li>• Fremdkörper während des Absaugvorgangs</li> <li>• Rückstände im Einlauf und Überlauf</li> <li>• Kontamination durch Handschuhe</li> <li>• Fremdkörper während des Pulvertransports</li> <li>• Unsaubere Flaschen/ Ventile</li> <li>• Rückstände im Sieb</li> <li>• Granulate/ Staubstrahlprozess der Bauplattform</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Granulate/ Staub aus dem Strahlprozess der Bauplattform</li> <li>• Haare/ Schuppen</li> <li>• Aufgewirbelter Staub/ Partikel</li> <li>• Abrieb in Rohren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gummiartikel von Handschuhen</li> <li>• Bürstenhaare beim Auspacken von Komponenten</li> <li>• Metallpartikel von Füllern</li> <li>• Fremdkörper auf Werkzeugen</li> <li>• Abrieb von Schrauben/ Gewinden beim Wechseln von Klingen</li> </ul>

Der Hauptfokus lag auf der Handhabung und Ausrüstung im SLM-Prozess sowie auf der Vorbereitung und Entpackens des/im Bauraum/s. Während des SLM-Prozesses wurde ein Pulverauftragssystem mit einer Gummilippe verwendet. Dies kann während des Prozesses Abrieb erzeugen und direkt in das Pulver gelangen. Beim Entpacken des gefertigten Bauteils wurde ein Pinsel verwendet, um das Pulver von den Komponenten zu entfernen. Die Mitarbeiter\*innen trugen Gummihandschuhe und Laborkittel. Zur Reinigung der Bauräume von verbliebenen Rückständen wurden Papiertücher verwendet. Das Entpacken der gefertigten Teile erfolgte unter atmosphärischen Bedingungen. Dies bedeutet, dass während des Ausräumens die Kammer geöffnet war und das Pulver mit Luft in Kontakt kommen konnte, ebenso wie mit Staubpartikeln oder Kleidungsfasern. All diese Einflüsse sind organische Kontaminationsquellen, die in das Pulver gelangen und somit auch in den Schmelzprozess eingetragen werden können.

### 2.3 Proben- und Maschinenpräparation

Die Testproben wurden in Form von Würfeln mit einer Kantenlänge von 10 mm hergestellt. Für jede Testreihe wurden sechs Würfel vorgesehen. Das Schema in Abbildung 2 veranschaulicht das schrittweise Verfahren. Zuerst wurden Würfel bis zu einer Höhe von 9,7 mm aufgebaut. Anschließend wurde der Bauprozess pausiert und die Gasströmung gestoppt. Das Verunreinigungsmaterial wurde manuell mit einem Bedienerhandschuh an

der Kammertür und Werkzeug unter Schutzgasatmosphäre auf die geschmolzene Schicht gelegt. Danach wurde der Bauprozess fortgesetzt. Die obere Schicht betrug etwa 0,3 mm. Die angepasste Schichtdicke für die Testproben betrug 60 µm.

Für die Installation der in Tabelle 2 aufgeführten Verunreinigungen wurde die Bauraumkammer der SLM 250HL-Maschine zunächst vorbereitet. Mit Werkzeugen wurden die Verunreinigungen in Schalen platziert, um den Beschichter und den Bauprozess nicht zu behindern. Die Bauplattform wurde mit einer dünnen Pulverschicht aus Ti-6Al-4V bedeckt. Abbildung 3 zeigt die Vorbereitung im Bauraum.

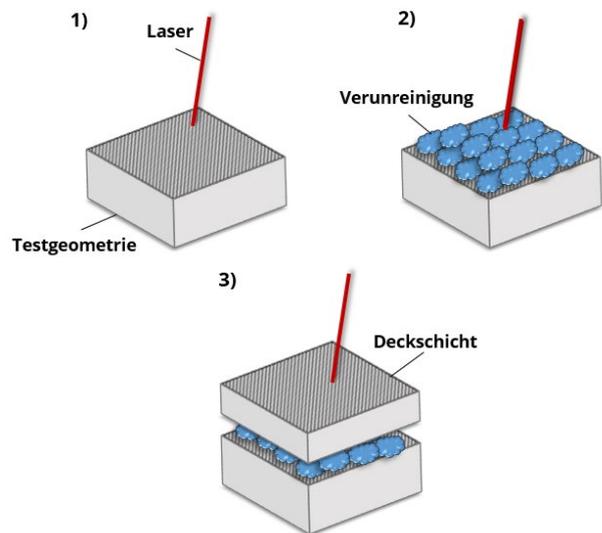


Abbildung 2: Prinzip des Einbringens von Verunreinigungen: 1) Herstellung des Grundkörpers, 2) Einbringung der Verunreinigung auf die Oberseite der Probe, 3) Herstellung der oberen Schicht

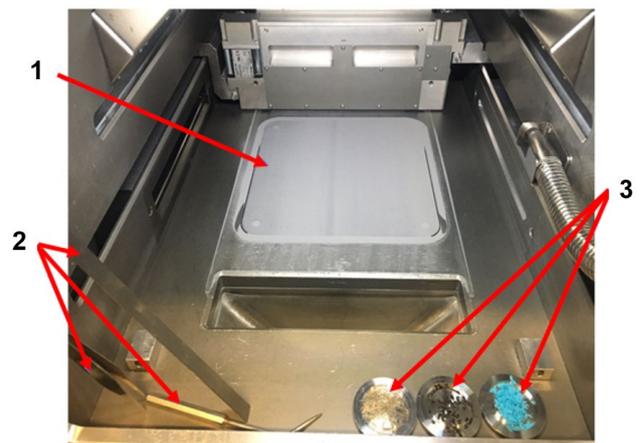


Abbildung 3: Vorbereitung des Bauraums innerhalb des SLM250 HL; Nr. 1: Bauplattform, Nr. 2: Werkzeuge zur Einlage der Fremdstoffe; Nr. 3: Schnipsel ausgewählter Verunreinigungen in Metallschalen

### 3 Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1 Additive Fertigung von kontaminierten Ti-6Al-4V-Proben

Der Versuch wurde unter den in Kapitel 2.3 beschriebenen Bedingungen durchgeführt. Abbildung 4 zeigt die Position der Würfel und der Verunreinigungen auf der Bauplattform. Das Bild wurde von der installierten Kamera aufgenommen, die auf die Bauplattform im SLM 250 HL fokussiert war. Als Verunreinigungen auf den Testproben wurden ausgewählte Kontaminationen gemäß Tabelle 2 verwendet, darunter Stücke von Gummihandschuhen, Gummilippen, Pinselhaaren und Papiertüchern. Bei Fortsetzung des Prozesses wurde die Schicht mit der aufgelegten Verunreinigung zweimal belichtet. Ein vergrößerter Lichtbogen wurde sichtbar, wenn die Verunreinigungen getroffen wurden. Abbildung 5 zeigt die Änderung des Plasmabogens zwischen Referenzmaterial und Gummihandschuh bei der Belichtung von Testwürfeln und Verunreinigungen. Während der Herstellung wurden die eingebrachten Verunreinigungen teilweise aus dem Gasstrom geblasen oder wurden aufgrund ihres geringen Gewichts vom Laser weggeschossen. Dies ähnelt dem Transport von Schweißspritzern während des Prozesses [18]. Die verbleibenden Verunreinigungen wurden während der Wechselwirkung mit dem Laserstrahl pyrolysiert. Nach zweimaliger Belichtung trug der Beschichter neues Pulver auf und schob die verbliebenen losen Verunreinigungen in den Überlauf. Die verbleibende Schichthöhe von 0,3 mm wurde aufgebaut.

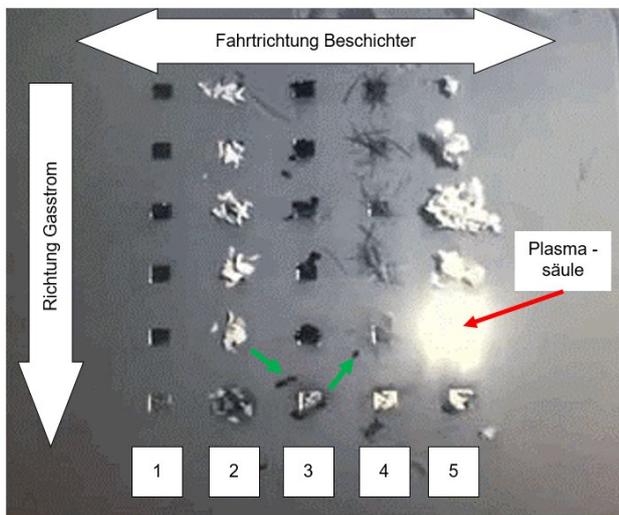


Abbildung 4: Position der Verunreinigungsschnipsel auf der Testprobe nach der ersten fortgesetzten Schicht. Grüne Pfeile: Verunreinigung Nr. 3 wurde vom Laser entfernt; Nr. 1: Ti-6Al-4V-Probekörper (ohne Fremdstoff), Nr. 2: Schnipsel eines Gummihandschuhs, Nr. 3: Schnipsel einer Gummilippe des Beschichters, Nr. 4: Pinselhaare, Nr. 5: Schnipsel von Papiertüchern

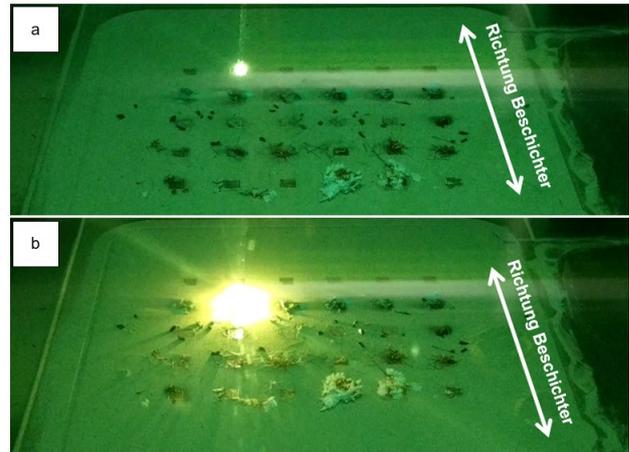


Abbildung 5: Veränderung des Plasmabogens, wenn der Laser auf organische Verunreinigungen trifft: 1) Plasmasäule auf Ti-6Al-4V-Referenzgeometrie, 2) Plasmasäule auf Gummihandschuh

#### 3.2 Mikrostruktur der Ti-6Al-4V-Probekörper

Der Einfluss der eingelegten Verunreinigungen auf die Mikrostrukturbildung der SLM Ti-6Al-4V-Legierung wurde mithilfe der Lichtmikroskopie und der Rasterelektronenmikroskopie (REM) mit EDX-Analyse untersucht. Um den Verunreinigungsbereich und die Veränderung in der Mikrostruktur entlang der Baurichtung zu erkennen, wurde der vorbereitete Würfelschnitt vor der Lichtmikroskopie-Untersuchung mit einer Wasserstoffperoxidlösung geätzt. Abbildung 6 zeigt die Mikrostruktur aus dem Längsschliff eines Testwürfels mit Gummihandschuh im differentiellen Interferenzkontrast- und Dunkelfeldmodus. Wie zu sehen ist, ist der Unterschied zur umgebenden Ti-6Al-4V-Mikrostruktur deutlich sichtbar. Die Existenz der organischen Verunreinigung während des SLM-Prozesses führt zu einer Unterbrechung der martensitischen Ti-6Al-4V-Struktur. Dieser unterscheidbare Bereich befindet sich etwa 300 µm unter den oberen Würfelflächen, was der Einsetzhöhe des Gummihandschuhs während der Probenherstellung entspricht. Aufgrund der begrenzten Auflösung der Lichtmikroskopie sind jedoch keine detaillierten Informationen zur Struktur des beobachteten Bereichs möglich. Die Schnitte aus den gedruckten Würfeln mit anderen Verunreinigungen (Gummilippe, Bürstenhaaren und Papiertüchern) wurden ebenfalls unter dem Lichtmikroskop untersucht. Bei diesen Proben konnte kein kontaminierter und unterscheidbarer Bereich von der Legierungsmatrix in der Mikrostruktur beobachtet werden. Dennoch kann die Existenz der genannten Verunreinigungen in der Mikrostruktur nicht ausgeschlossen werden und sind wahrscheinlich in der Materialstruktur gleichmäßig verteilt. Es ist auch vorstellbar, dass die Verunreinigungen in einem solchen Fall vollständig oder weitgehend vom Laserstrahl verbrannt und entfernt werden, bevor sie in die Schmelzzone eingeschlossen werden. Basierend darauf werden die Proben hier nicht weiter berücksichtigt. Da die Verunreinigung durch den Gummihandschuh jedoch in der Mikrostruktur deutlich zu erkennen ist, ist sie besser geeignet für eine weitere

Untersuchung, um die Rolle von organischen Verunreinigungen bei der Mikrostrukturbildung während des SLM-Prozesses zu verstehen.

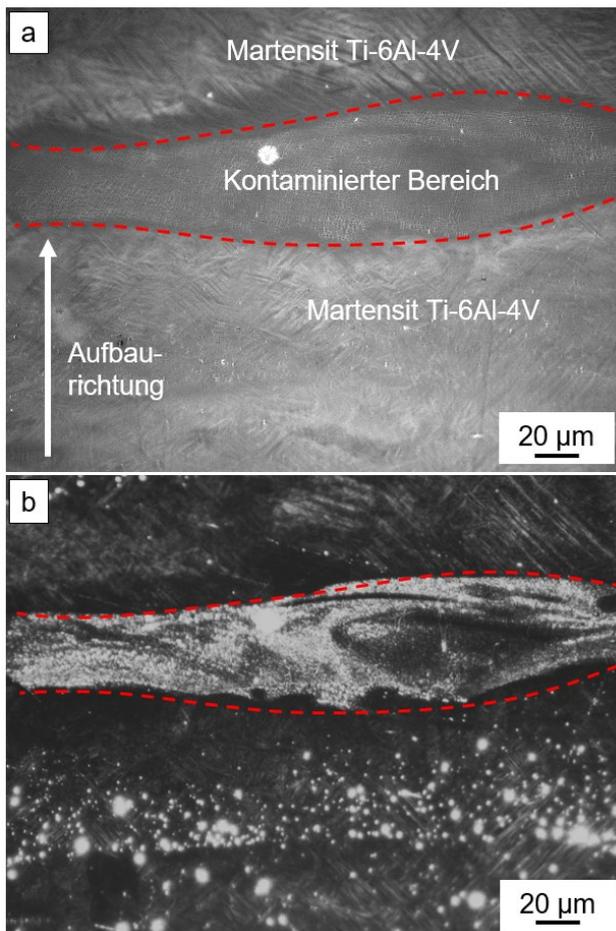


Abbildung 6: Lichtmikroskopie-Bilder von Ti-6Al-4V / Gummihandschuh in a) Differenziell-Interferenzkontrast und b) Dunkelfeld. Die rot markierte Fläche zeigt eine Strukturveränderung im Material. Diese befindet sich etwa 300 µm unter der Bauteiloberfläche, was der Einsetzhöhe der Verunreinigung entspricht. Dieser Bereich unterscheidet sich von der umgebenden martensitischen Struktur.

Um die feine Mikrostruktur des kontaminierten Bereichs mit Gummihandschuh aufzulösen und Informationen zur chemischen Zusammensetzung zu erhalten, wurde der Probenabschnitt in hoher Auflösung mit REM und EDX-Elementaranalyse sorgfältig beobachtet. Die REM-Aufnahmen aus verschiedenen Positionen im kontaminierten Bereich sind in Abbildung 7 dargestellt. Grundsätzlich repräsentiert der in Abbildung 7a markierte kontaminierte Bereich eine Zweiphasen-Mikrostruktur. Die hochvergrößerten Bilder aus zwei verschiedenen Positionen innerhalb des untersuchten Bereichs (Abbildung 7b und c) zeigen deutlich die Verteilung der beiden Phasen zueinander. Im Allgemeinen kann zwischen zwei mikrostrukturellen Erscheinungsformen unterschieden werden. In der ersten, wie in Abbildung 7b dargestellt, ist die dunkle Phase in der umgebenden Legierung in Form von Lamellen verteilt, die jedoch keinen kontinuierlichen Charakter haben. Es besteht aus vielen kleinen und getrennten Partikeln, d.h. kettenförmige Phase. In

der zweiten, wie in Abbildung 7c gezeigt, bildet die zweite dunkle Phase eine dendritische Struktur innerhalb der Legierung. Durch eine höhere Vergrößerung im Sekundärelektronendetektionsmodus in Abbildung 7d werden weitere Informationen über die Morphologie der aufgebauten Phase gewonnen. Gemäß den Aufnahmen besteht die neue Phase aus getrennten oder teilweise verschweißten Partikeln mit hauptsächlich kugelförmiger Morphologie und einer Größe von mehreren Hundert Nanometern. Der dunklere Kontrast in den SEM-Bildern in Abbildung 7b und c deutet auf das Vorhandensein von Elementen mit niedriger Ordnungszahl hin. Um diese Elemente zu identifizieren, wurden EDX-Spektren von verschiedenen Positionen, wie in Abbildung 8 gezeigt, gesammelt. Gemäß dem in Abbildung 7 dargestellten Ergebnis werden nur die Elemente Ti, Al, V und C erkannt. Durch den Vergleich der Spektren von Punkt 1 und 2 ist offensichtlich, dass im dendritischen Aufbau mehr Kohlenstoff vorhanden ist. Das Kohlenstoffspektrum von Punkt 1 (also von Ti-6Al-4V) stammt von der Kohlenstoffbeschichtung der Probe vor der Untersuchung. Das Spektrum, das von Punkt 3 genommen wurde, d.h. von einem Partikel, bestätigt ebenfalls das Vorhandensein von Kohlenstoff in der gebildeten Phase. Da hier keine anderen Elemente aus den organischen Verunreinigungen erkannt werden konnten, wie etwa Sauerstoff, bedeutet dies, dass die hinzugefügten Bestandteile des Gummihandschuhs unter dem Laserstrahl pyrolysiert werden und elementaren Kohlenstoff im Schmelzbad hinterlassen. Andere Elemente entweichen als gasförmige Nebenprodukte. Diese Pyrolyse und die Wechselwirkung zwischen den entstehenden Gasen und dem Laserstrahl könnten der Hauptgrund für die stärkere Beleuchtung in Abbildung 5b sein.

Die REM-Analyse ermöglicht jedoch keine abschließende Schlussfolgerung, ob es sich bei der erkannten zweiten Phase um elementaren Kohlenstoff oder eine Karbidphase handelt. Aufgrund der geringen Menge an Verunreinigungen ist eine Phasenanalyse mit anderen Methoden wie der Röntgenbeugung nicht möglich. Aber da Titan im schmelzflüssigen Zustand ein hoch reaktives Element ist, ist es unwahrscheinlich, dass elementarer Kohlenstoff diese extremen Bedingungen überleben kann und daher in elementarer Form erstarrt. In den Arbeiten beispielsweise von [19] und [20] wird ein partikelverstärkter Titan-Matrix-Verbundwerkstoff durch die in-situ-Reaktion von Titan und Kohlenstoff zu Titankarbid hergestellt. In [20] findet die Reaktion zwischen Titan und Kohlenstoffnanoröhren sogar im Festzustand statt. Daher handelt es sich bei der in dieser Arbeit beobachteten Phase höchstwahrscheinlich um eine TiC-Phase. Basierend auf Untersuchungen in [21] hängt die Morphologie des gebildeten TiC in der Ti-6Al-4V-Mikrostruktur vom Kohlenstoffgehalt ab. Mit steigendem Kohlenstoffgehalt (in der zitierten Arbeit Graphit von 0,15 auf 2%) ändert sich die Morphologie von Partikeln zu kurzen Stäben und schließlich zu einer dendritischen Struktur.

Ähnliche Beobachtungen werden in dieser Untersuchung gemacht, was bedeutet, dass die unterschiedliche Mikrostruktur in Abbildung 7b und c auf unterschiedliche lokale Verunreinigungs-niveaus und damit unterschiedliche Kohlenstoffgehalte zurückzuführen sein kann.

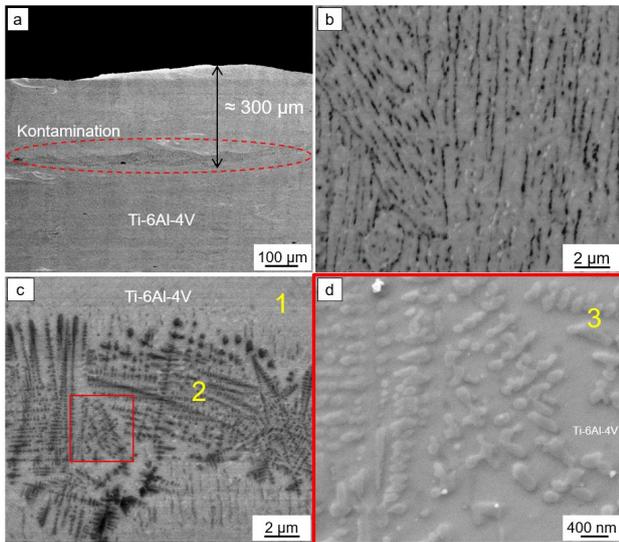


Abbildung 7: REM-Aufnahmen aus verschiedenen kontaminierten Bereichen aus dem Längsschliff der Ti-6Al-4V-Probe mit Verunreinigungen durch Gummihandschuhe. a-c) Rückstreuungselektronendetektormodus, d) Sekundärelektronendetektormodus. Die dunklen Bereiche in b und c werden durch die Verunreinigung durch den Gummihandschuh verursacht

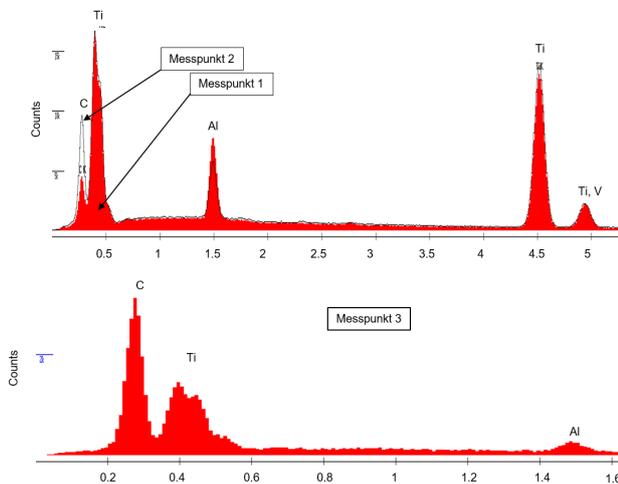


Abbildung 8: REM-EDX-Analyse der markierten Punkte in Abbildung 5a und b, die das Vorhandensein der Kohlenstoffverunreinigung in der Ti-6Al-4V-Mikrostruktur zeigen

## 4 Schlussfolgerung

Die Ergebnisse zeigen eindeutig den Einfluss von Fremdpartikeln auf die Ti-6Al-4V-Struktur. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass die Fremdpartikel während des Prozesses entfernt und nicht in das Schmelzbad sowie in das Material eingeführt werden, aufgrund der unterschiedlichen Prozesseinflüsse wie Gasflussgeschwindigkeit oder Laserleistung und -geschwindigkeit. Darüber hinaus ist eine hohe Menge an Fremdpartikeln erforderlich, um die Unordnung oder die neue Phase in der Ti-6Al-4V-Struktur zu erzeugen.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass die in diesem Rahmen absichtlich in den Prozess eingebrachte Kontamination hoch angesetzt wurde, um die Untersuchung ihrer Auswirkung auf die Mikrostruktur zu ermöglichen. Daher ist es unwahrscheinlich, dass dies in diesem Ausmaß in einem Standard-SLM-Prozess und unter strengen Vorbeugungsmaßnahmen auftritt. Dennoch sollten organische Substanzen vermieden werden, da sie aufgrund ihres Pyrolyseverhaltens eine Kohlenstoffquelle darstellen, die zu einer spröden Karbidphase in der Mikrostruktur führt. Ob dies die Einsatzfähigkeit der hergestellten Teile beeinflusst und in welchem Maße, hängt von der Morphologie, der Größe der gebildeten Phase und der betrachteten Eigenschaft ab. Beispielsweise kann nadelförmiges Karbid die Ermüdungslebensdauer von SLM-Titanlegierungsteilen negativ beeinflussen, da es als Keimbildungsstelle für defektauslösende Fehler wirken kann.

## Danksagung / Angaben zum Fördermittelgeber

Die Autoren dieser Veröffentlichung möchten sich beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) für ihre finanzielle Unterstützung im Rahmen des Projekts LuFo V-3 PAULA und bei Liebherr-Aerospace Lindenberg GmbH für ihre Zusammenarbeit bedanken.

## Kontakt Daten

Kerstin Winkler, M. Sc.

Wissenschaftliche Mitarbeiterin Additive Fertigung  
Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung

Technische Universität Chemnitz

Email: [kerstin.winkler@mb.tu-chemnitz.de](mailto:kerstin.winkler@mb.tu-chemnitz.de)

Tel.: +49 (0) 371/531-34067

ORCID: 0000-0001-5530-0850

<https://www.leichtbau.tu-chemnitz.de/am/>

## Literaturverzeichnis

- [1] Altiparkmak, S. C.; Xiao, B.: A market assessment of additive manufacturing potential for the aerospace industry. *Journal of Manufacturing Processes* 68 (2021), p. 728-739. doi: 10.1016/j.jmapro.2021.05.072
- [2] Uckelmann, I: Buy-to-fly Ratio, Cutting Costs with Metal 3D Printing. *Materialise Manufacturing*. Materialise NV, 2017.
- [3] Liu, R.; Wang, Z.; Sparks, T.; Liou, F.; Newkirk, J.: Aerospace applications of laser additive manufacturing. In: *Laser Additive Manufacturing: Materials Design, Technologies and Applications*. Woodhead Publishing, 2017. p. 351-371. doi: 10.1016/C2014-0-03891-9
- [4] Dutta, B.; Froes, F. H.: *Additive Manufacturing of Titanium Alloys: State of the Art, Challenges, and Opportunities*. Elsevier Science, 2016. doi: 10.1016/C2015-0-02470-4
- [5] DIN EN ISO 52900: Additive manufacturing - General principles - Fundamentals and vocabulary, 2021.
- [6] Yadroitsev, I.; Yadroitsava, I.; Du Plessis, A.: Basics of laser powder bed fusion. In: *Fundamentals of Laser Powder Bed Fusion of Metals*. Elsevier Science, 2021. p. 18 ff. doi: 10.1016/B978-0-12-824090-8.00024-X
- [7] Russell, R.; Wells, D.; Waller, J. et al.: Qualification and certification of metal additive manufactured hardware for aerospace applications. In: *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*. Elsevier Science 2019. S. 33-66. doi: 10.1016/B978-0-12-814062-8.00003-0
- [8] Blakey-Milner, B; Gradl, P.; Snedden, G. et. al.: Metal additive manufacturing in aerospace: A review. In: *Materials & Design* 209. Elsevier Science, 2021. doi: 10.1016/j.matdes.2021.110008
- [9] DIN SPEC 17071: Additive Fertigung - Anforderungen an qualitätsgesicherte Prozesse für additive Fertigungszentren, 2019.
- [10] Seyda, V.; Emmelmann, C. (Hrsg.): *Werkstoff- und Prozessverhalten von Metallpulvern in der laseradditiven Fertigung*. Berlin: Springer Vieweg, 2018. p. 33-57. doi: 10.1007/978-3-662-58233-6
- [11] HSM Stahl- und Metallhandel GmbH: Werkstoffdatenblatt 3.7164/Ti6Al4V Titan Grade 5, 2022. [https://www.hsm-stahl.de/fileadmin/user\\_upload/datenblatt/HSM\\_Datenblatt\\_3.7164.pdf](https://www.hsm-stahl.de/fileadmin/user_upload/datenblatt/HSM_Datenblatt_3.7164.pdf). (online 07/05/2022).
- [12] Wycisk, E.; Emmelmann, C. (Hrsg.): *Ermüdungseigenschaften der laseradditiv gefertigten Titanlegierung Ti6Al4V*. Berlin: Springer Vieweg, 2017. doi: 10.1007/978-3-662-56060-0
- [13] Suresh, S.; Sun, C.-N.; Tekumalla, S.: Mechanical properties and in vitro cytocompatibility of dense and porous Ti-6Al-4V ELI manufactured by selective laser melting technology for biomedical applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 123. Elsevier Science, 2021. doi: 10.1016/j.jmbbm.2021.104712
- [14] AP&C, Ti-6Al-4V grade 23 powder, Material Certificate No: MC-17-0120, Quebec (Canada), 2017, Material Certificate.
- [15] Handke, V.: *Kornfeinung von Titanschweißnähten durch mechanisch-thermische Behandlung*. Doctoral thesis. Hamburg University of Applied Sciences, 2012.
- [16] Hooper, P. A.: Melt pool temperature and cooling rates in laser powder bed fusion. In: *Additive Manufacturing* 22. Elsevier, 2018. S. 548-559. doi: 10.1016/j.addma.2018.05.032
- [17] Böttcher, K.; Winkler, K.: Microstructure Visibility of Additive Manufactured Ti-6Al-4V Geometries without Hydrofluoric Acid. In: Müller, B. (ed.): *Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference DDMC 2020*. Berlin: Fraunhofer Verlag, 2020.
- [18] Bin Anwar, A.; Ibrahim, I. H.; Pham, Q.-C.: Spatter transport by inert gas flow in selective laser melting: A simulation study. In: *Powder Technology* 352. Elsevier, 2019. p. 103-116
- [19] Wei, Z. J; Cao, L. et. al.: Microstructure and mechanical properties of TiC/Ti-6Al-4V composites processed by in situ casting route. In: *Materials Science and Technology* 27(8). Maney Publishing, 2011. p. 1321-1327. doi:10.1179/026708310X12699498462922
- [20] Wei, W.-H., Shao, Z.-N., Shen, J., & Duan, X.-M.: Microstructure and mechanical properties of in situ formed TiC-reinforced Ti-6Al-4V matrix composites. *Materials Science and Technology*, 34(2), p. 191-198. doi:10.1080/02670836.2017.1366737
- [21] Wang, X; Gai, P.-T.: Effect of carbon content on microstructure and property of TiC/Ti-6Al-4V composites. In *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 17. Science Press, 2007. p. 546-550