

Online-Prozesskontrolle bei der additiven Fertigung mittels Laserstrahlschmelzen

Günter Zenzinger, Joachim Bamberg, Thomas Hess, Alexander Ladewig
 MTU Aero Engines AG, Dachauerstr. 665, 80995 München

1 Einleitung additive Fertigung

Unter additiven Fertigungsverfahren werden Verfahren verstanden, mit deren Hilfe komplexe Bauteile auf Basis von computergenerierten Datenmodellen aus formlosem Ausgangsmaterial aufgebaut werden. Dazu werden außer einer Fertigungsanlage keine weiteren Hilfsmittel wie z.B. Werkzeuge benötigt.

Die additive Fertigung bietet im Vergleich zu heutigen, konventionellen Herstellverfahren eine wesentlich höhere Designfreiheit und ein großes Potenzial hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, da der Einsatz von Werkzeugen wie zum Beispiel Gussformen wegfällt. Rohteilkosten können hiermit deutlich reduziert und Durchlaufzeiten erheblich verringert werden [1].

Diese Vorteile sollen auch für die Herstellung von Luftfahrtbauteilen genutzt werden. Wegen der hohen Sicherheitsanforderungen muss hier jedoch das Thema Prüftechnik und Prozesskontrolle besonders beachtet werden. Deshalb liegt auch der Fokus zunächst auf der Herstellung unkritischer, gering belasteter Bauteile, wie z.B. Boroskopaugen, die als Anbauteile am Triebwerk montiert werden (Abb.1).

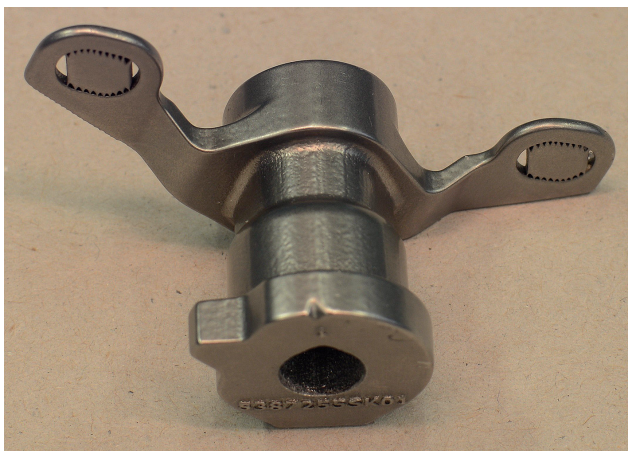


Abbildung 1: Additiv hergestelltes Boroskopauge für die Verwendung am Triebwerksgehäuse (Größe: ca. 5 x 5 x 5 cm³)

Langfristig sollen im Triebwerksbau bei MTU Aero Engines mittels additiver Fertigung Bauteile wie Gehäusesegmente mit Honigwaben in integraler Bauweise produziert werden, die bisher aus einzelnen, gelöteten Blechsegmenten bestehen, sowie zukünftig auch bionisch geformte Bauteile, die mit herkömmlichen Fertigungsverfahren heute nicht herstellbar sind.

2 Grundlagen SLM

Das Laserstrahlschmelzen (Selective Laser Melting, SLM) zählt zur Gruppe der additiven Fertigungsverfahren und basiert auf dem schichtweisen Aufbau durch Aufschmelzen und Verfestigen von pulverförmigen Ausgangsstoffen aus einem Pulverbett. Das Grundprinzip des Verfahrens ist

in Abb. 2 schematisch dargestellt.

Auf eine Bauplattform wird mit Hilfe von Laserstrahlung Schicht für Schicht ein Bauteil aufgeschweißt. Dazu wird die Bauplattform zunächst mit einer Pulverschicht überzogen. Im Bereich des späteren Bauteils wird das Pulver verschweißt. Anschließend wird die Bauplattform um die gleiche Schichtstärke abgesenkt und der Prozess beginnt wieder mit einem erneuten Pulverauftrag.

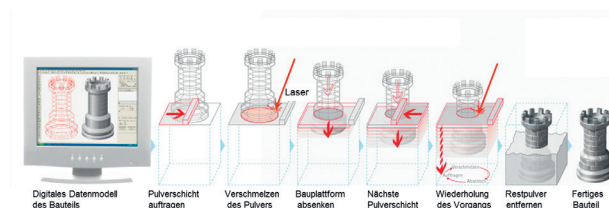


Abbildung 2: Schematischer Ablauf des SLM Prozesses

3 Qualitätsaspekte SLM

Die Qualitätssicherung und Dokumentation der Produktentstehung ist im Triebwerksbau ein Thema von sehr großer Bedeutung. Jedes fliegende Bauteil muss ausgehend vom Rohmaterial bis zum Endprodukt lückenlos überwacht und die Fehlerfreiheit sichergestellt werden. Wie auch bei anderen Schweißverfahren können beim SLM folgende Fehler entstehen:

- Hohlräume, Poren, Lunker
- Feste Einschlüsse – Schlacke
- Bindefehler und ungenügende Durchschweißung

Aufgrund des schichtweisen Aufbaus sind diese Fehler meist sehr klein bzw. extrem flach. Deshalb und wegen der meist komplexen Geometrie mittels SLM hergestellter Bauteile ist die Anwendung von konventionellen ZfP-Techniken wie Ultraschall oder Röntgenverfahren meist nicht möglich oder nicht ausreichend.

Dies soll am Beispiel der Röntgen-Computertomographie (CT) aufgezeigt werden. Mit Hilfe dieses Verfahrens können innere, volumenbehafte Fehler orts aufgelöst sichtbar gemacht werden. In Abbildung 3 sieht man durch speziell gewählte Herstellparameter künstlich erzeugte Poren in einer SLM-Probe. Bei der hier verwendeten Bauteilprobe (Ø 10 mm, Länge 70 mm, Werkstoff IN718) sind mit Hilfe einer Helix-CT volumenartige Fehlstellen bis zu einer minimalen Größe von ca. 50 µm erkennbar. Zusätzlich zu den gezeigten Fehlstellen können, durch den Schweißprozess bedingt, aber auch sehr flache Fehlstellen mit einem sehr geringen Volumen (Ausdehnung in einer Richtung nur wenige µm) entstehen. In Schliften von SLM-Proben wurden Bindefehler mit einer Dicke von 10 µm und kleiner nachgewiesen. Diese sind nach dem heutigen Stand der Technik und bei den hier verwendeten Materialien

und Bauteilgrößen mit CT oder Röntgenverfahren nicht zu detektieren.

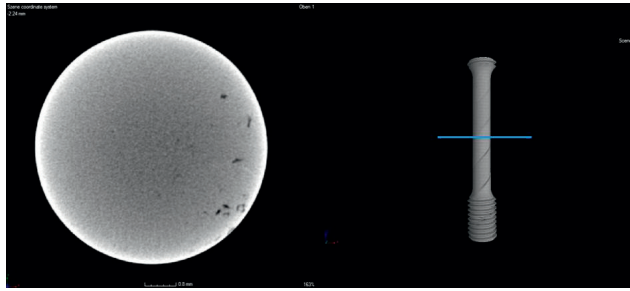


Abbildung 3: CT-Aufnahme einer SLM-Probe mit innerer Porosität

Auf Grund ihres Prinzips des schichtweisen Aufbaus bieten additive Fertigungsverfahren völlig neue Möglichkeiten zur Qualitätssicherung. Zusätzlich zur Prüfung des fertigen Bauteils kann die Herstellung jeder einzelnen Lage kontinuierlich überwacht und damit die Qualität des Produkts beschrieben werden. Anwendung finden dabei verschiedene Konzepte und Sensoren.

Eine relativ einfache Methode zur Onlineprozesskontrolle ist die Überwachung und Dokumentation der Prozessparameter. Derartige Lösungen werden von den meisten Anlagenherstellern mit angeboten. Gängige Größen, welche durch diese Systeme überwacht werden, sind z.B. Laserleistung (gemessen an Quelle), Plattformtemperatur und -Position oder Sauerstoffgehalt der Schutzgasatmosphäre. Eine Aussage über die Bauteilqualität auf Basis dieser Systeme birgt jedoch ein Risiko, da Einflussgrößen, die nicht abgebildet werden, wie beispielsweise Turbulenzen in der Schutzgasströmung, den Prozess empfindlich stören und damit die Bauteilqualität negativ beeinflussen können.

Ein Großteil der Überwachungssysteme basiert auf optischen Sensoren. Grundsätzlich lassen sich diese optischen Systeme in zwei verschiedene Methoden untergliedern. Zum Einen werden Sensoren – zumeist Photodioden oder Photodiodenarrays – eingesetzt, die durch den Strahlengang des Lasers (On-Axis) messen. Vorteilhaft an diesen Systemen sind die hohen erzielbaren Messfrequenzen, bei denen entweder durch Messung der Leuchtintensität des Schmelzbades oder der Schmelzbadgeometrie (Breite/Länge), Aussagen über den Schweißprozess abgeleitet und Regelkonzepte entwickelt werden [2]. Nachteil ist dabei allerdings, dass lediglich die Prozesszone und ggf. noch das nahe Umfeld beobachtet wird und Störungen außerhalb dieses Bereichs nicht berücksichtigt werden.

Bei der anderen Methode wird das Messsystem außerhalb des Strahlgangs (Off-Axis) des Lasers platziert. Dabei beobachtet das Messsystem die gesamte Baufläche oder einen Ausschnitt daraus. Dies kann beispielsweise durch hochauflösende Digitalkameras [3] oder durch Thermografiekameras [4] realisiert werden. Bei den Systemen basierend auf Digitalfotos wird die Oberfläche nach dem Schweißprozess erfasst und das entstandene Schweißbild bewertet (Ausprägung, Breite, Lage der Raupen). Die Thermografielösungen bieten den Vorteil, dass sie die im Bauteil vorherrschenden Temperaturen und die Abkühlraten bestimmter Punkte erfassen können. Nachteilig ist dabei die geringe geometrische Auflösung heutiger Thermografiesysteme.

All diese Systeme sind nur bedingt zur 100%-Dokumentation des Fertigungsprozesses unter Serienbedingungen geeignet. Aus diesem Grund wurde bei MTU die Optische Tomografie (OT) zur hochauflösenden Online-Prozesskontrolle des SLM-Verfahrens entwickelt. Folgende Anforderungen stehen hierbei im Vordergrund:

- Geometrisch hochauflösende Dokumentation des gesamten Herstellprozesses
- Möglichkeit zur „einfachen“ Adaption an die SLM-Maschinen
- Korrelation der OT-Daten zu möglichen Fehlertypen
- Nachweis der Fehlerfreiheit von Bauteilen aufgrund der OT-Ergebnisse.

4 Optische Tomografie für SLM (OT)

Bei diesem Verfahren zur Online-Prozesskontrolle wird die Bauplattform kontinuierlich mit einer hochauflösenden CCD- oder CMOS-Kamera beobachtet und die Strahlungsintensität des Schweißvorgangs ortsgetreu aufgezeichnet (Abbildung 4 und 5).

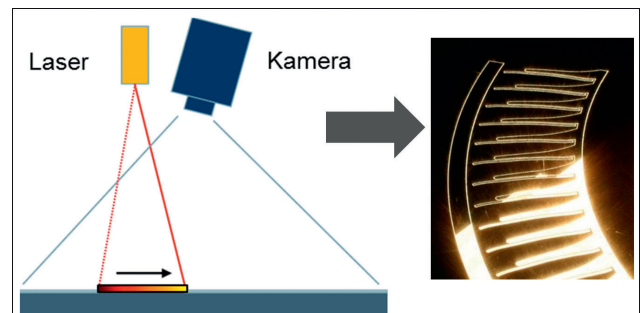


Abbildung 4: Funktionsprinzip Optische Tomografie

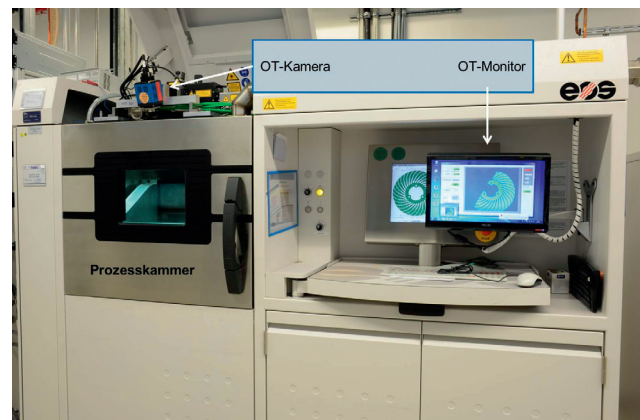


Abbildung 5: SLM-Anlage mit dem Messsystem „Optische Tomografie“

Die mit hoher Frequenz anfallenden Einzelbilder werden miteinander verrechnet und es wird ein Auswertebild jeder gebauten Schicht erzeugt (Abb. 6). Durch den Einsatz eines thermisch stabilisierten Kamerasystems wird die quantitative Bewertung der Strahlungsintensitäten ermöglicht. Störsignale werden durch angepasste spektrale Filter unterdrückt, so dass eine Korrelation der OT-Signale zur Qualität des Schweißprozesses und damit zu potenziellen Fehlern im Bauteil ermöglicht wird [5]. Durch eine Überlappung der Schweißspuren werden in den Bildern regelmäßige Streifen

erzeugt. Diese verfahrensbedingten Streifen sind in jedem Schichtbild vorhanden und dürfen nicht als Abweichung interpretiert werden. Das verwendete Kamerasystem hat einen Detektor mit 5 Millionen Pixeln. Überträgt man dies auf eine Bauraumfläche von 250 x 250mm, so entspricht dies einer geometrischen Auflösung von ca. 0,1 mm pro Pixel.

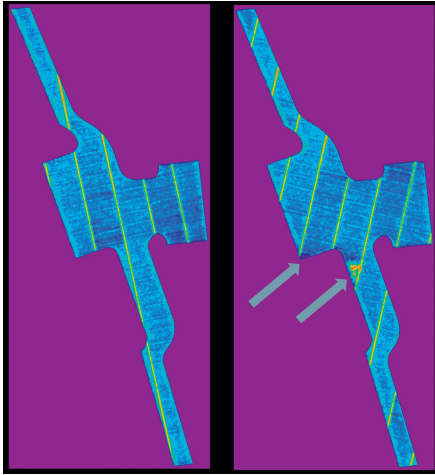


Abbildung 6: Falschfarbendarstellung zweier mittels Optischer Tomografie aufgenommener Bauteilschichten (links: korrekter SLM-Prozess; rechts: lokale Störungen im SLM-Prozess)

Bei einer Bauhöhe pro Lage von 40 µm werden für Bauteile mit einer Höhe von z.B. 100 mm 2500 Schichtlagen benötigt und somit für die Prozesskontrolle auch 2500 Bilder erzeugt. Durch die Kenntnis der Lagenhöhe erhält jeder OT-Bildpunkt ein Volumen und wird zum dreidimensionalen Voxel. Zusätzlich zur Analyse der einzelnen Bilder können die Bilderstapel nun auch mit einer professionellen CT-Software visualisiert und bewertet werden. Abbildung 7 zeigt die OT-3D-Darstellung eines kompletten Baujobs bestehend aus 3 Proben und 10 Bauteilen, Abbildung 8 die transparente Darstellung eines extrahierten Bauteils mit Anzeigen im Volumen.

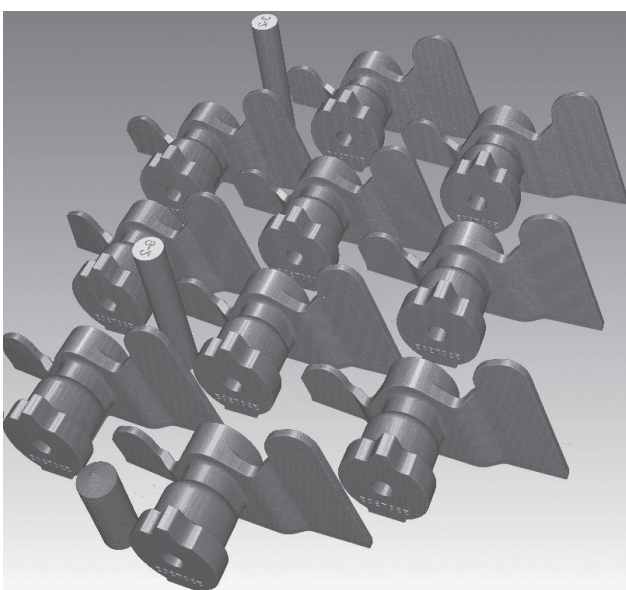


Abbildung 7: Volumendarstellung eines OT-Bilderstapels (OT-3D-Bild)

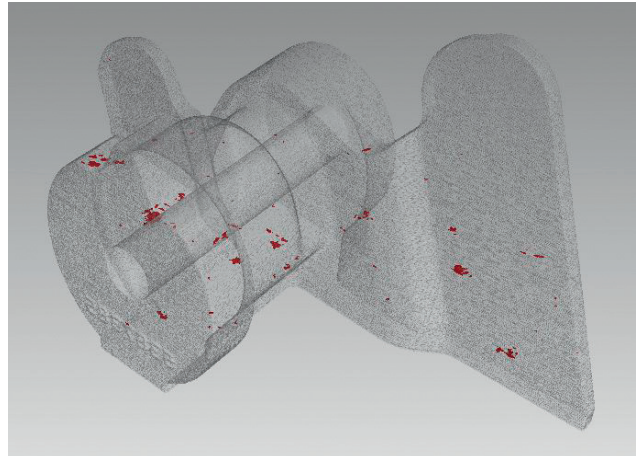


Abbildung 8: Transparentdarstellung eines Einzelbauteils mit Anzeigen im Volumen (rot)

Zerstörende Nachuntersuchungen haben gezeigt, dass in Bereichen mit OT-Anzeigen Bindefehler und Poren auftreten. Dagegen sind in Bereichen mit homogener Schweißstruktur keine Materialfehler nachweisbar.

Für die Korrelation der OT zur Bauteilqualität wurden Zugproben gebaut, bei denen durch Veränderung der Schutzgasströmung künstliche Fehler erzeugt wurden. In den OT-Aufnahmen führte diese Veränderung zu häufig wiederkehrenden sogenannten Hot-Spots.

Abbildung 9 zeigt links die farbige Transparentdarstellung der OT-Bilder einer Zugprobe mit optimalen Schweißparametern. In Abbildung 9 rechts ist ein Bauteil zu sehen, bei dem durch Reduzieren der Schutzgasströmung der Schweißprozess beeinträchtigt wurde. In diesem OT-3D-Bild sind deutliche Inhomogenitäten zu erkennen.

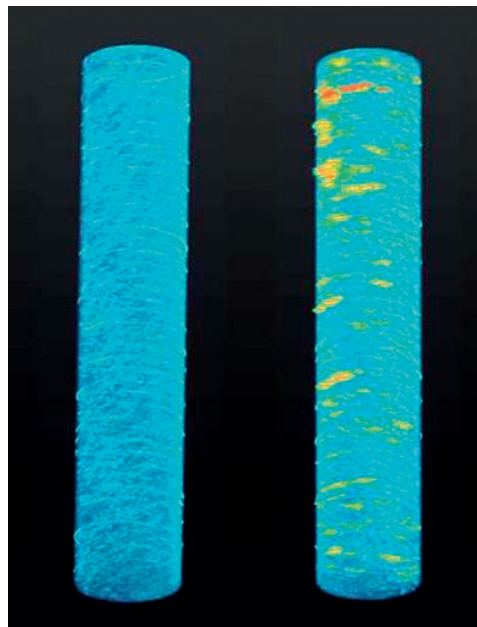


Abbildung 9: OT-3D-Bilder von SLM-Zugproben

Die Untersuchung der Bruchfläche dieser Probe nach dem Zugversuch zeigt deutliche Fehlstellen, die letztendlich zum Versagen an dieser Stelle führten (Abb. 10).

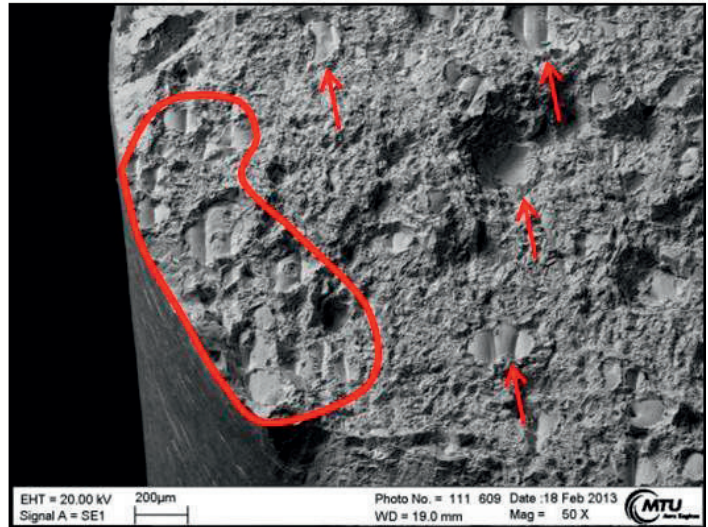
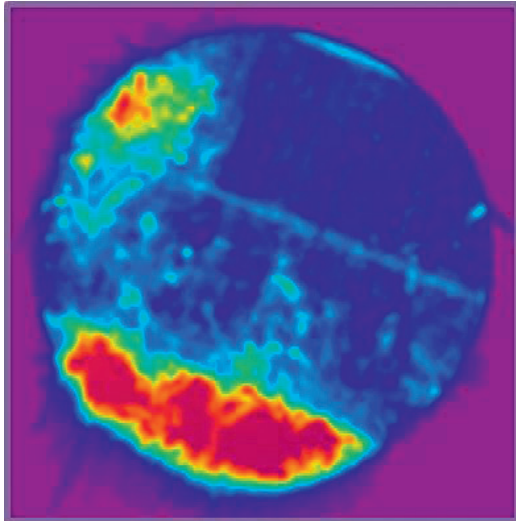


Abbildung 10: Auffälligkeiten (rote Flächen) im OT-Bild einer Einzelschicht von einer Zugprobe und Bruchfläche in genau dieser Ebene mit lokal fehlerhafter Schweißung (rote Linie)

Die dargestellten Beispiele zeigen, dass mit dem Verfahren Optische Tomografie der Schweißprozess bei der additiven Fertigung mittels SLM überwacht, dokumentiert und bewertet werden kann. Aufgrund der hohen geometrischen Auflösung und der lückenlosen Aufzeichnung steht ein Werkzeug zur Verfügung, mit dem die Qualität von SLM-Bauteilen hinreichend beschrieben werden kann, so dass diese Fertigungstechnik auch in der Luftfahrt einsetzbar ist. Die weitere Entwicklung der OT geht in Richtung automatische Auswertung der Bilderstapel, Erweiterung der Korrelation zu potentiellen Fehlern und die Erstellung von POD-Abschätzungen. Diese Arbeiten werden zusammen mit dem Anlagenhersteller EOS und der Firma Carl Messtechnik durchgeführt, so dass ein industrietaugliches Monitoringsystem, welches auch zur Regelung von Schweißparametern nutzbar ist, bereitgestellt werden kann.

Literaturverzeichnis

- [1] International Laser Technology Congress, 7 May 2014, Aachen: MTU Aero Engines, Dr. Karl-Heinz Dusel: Overview of the Complete Process Chain of Laser Additive Manufacturing
- [2] Universität Leuven 2009: EP 2032345 B1: Procedure and Apparatus for in situ Monitoring and Feedback Control of Selective Laser Powder Processing
- [3] RWTH Aachen 2012: Kleszczynski, Stefan et al. Error Detection in Laser Beam Melting Systems by High Resolution Imaging
- [4] TU München 2012: K. Krauss et al. Thermography for Monitoring the Selective Laser Melting Process
- [5] Europäische Patentanmeldung EP 2666612A1

Kontakt: <mailto:Guenter.Zenzinger@mtu.de>
<http://www.mtu.de>