

# In-situ Prüfung additiv gefertigter L-PBF-Bauteile mit aktiver Laserthermografie

Philipp Peter BREESE<sup>1</sup>, Tina BECKER<sup>1</sup>, Simon OSTER<sup>1</sup>, Christian METZ<sup>2</sup>,  
Simon J. ALTENBURG<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

<sup>2</sup> THETASCAN GmbH, Dinslaken

Kontakt E-Mail: philipp-peter.breese@bam.de

## Kurzfassung

Die additive Fertigung von metallischen Bauteilen (Additive Manufacturing - AM; auch 3D-Druck genannt) bietet eine Vielzahl an Vorteilen gegenüber konventionellen Fertigungsmethoden. Durch den schichtweisen Auftrag und das selektive Aufschmelzen von Metallpulver im Laser Powder Bed Fusion Prozess (L-PBF) sind u.a. optimierte und flexibel anpassbare Designs und die Nutzung von neuartigen Materialien möglich. Aufgrund der Komplexität des AM-Prozesses und der Menge an Einflussfaktoren ist eine Qualitätssicherung der gefertigten Bauteile unabdingbar. Verschiedene in-situ Monitoringansätze werden bereits angewendet, jedoch findet eine dedizierte Prüfung erst im Nachgang der Fertigung ex-situ statt. Der Grund dafür ist, dass die Entstehung von geometrischen Abweichungen und Defekten auch zeitversetzt zum eigentlichen Materialauftrag und damit auch zum Monitoring stattfinden kann. Die Notwendigkeit geeigneter in-situ Prüfmethoden für L-PBF, um die Erforderlichkeit einer Nacharbeitung frühzeitig festzustellen und Ausschuss zu vermeiden ist angesichts kostenintensiver Ausgangsstoffe und einer oftmals mehrstündigen bis mehrtägigen Prozessdauer besonders hoch.

Daraus motiviert wird im Rahmen des Projektes ATLAMP die Möglichkeit der aktiven Laserthermografie mit Hilfe des defokussierten Fertigungslasers untersucht. Damit ist, bei vergleichsweise geringer Laserleistung, eine zerstörungsfreie Prüfung mittels Flying Spot Thermografie möglich. Diese findet jeweils anschließend an die Fertigung einer Schicht statt, womit der reale Status des Bauteils im Verlauf des AM-Prozesses geprüft wird.

Als Grundlage dafür werden im Rahmen dieser Arbeit mit AM gefertigte, defektbehaftete Probekörper zunächst losgelöst vom Fertigungsprozess untersucht. Damit werden die Grundlagen für den neuartigen Ansatz der aktiven in-situ Laserthermografie im L-PBF-Prozess mittels des Fertigungslasers geschaffen. Auf diese Weise lassen sich auch zeitversetzt auftretende Defekte zerstörungsfrei im Prozessverlauf feststellen und eine aussagekräftige Qualitätssicherung des Ist-Zustands des Bauteils erreichen.

29. September 2022

# IN-SITU PRÜFUNG ADDITIV GEFERTIGTER L-PBF-BAUTEILE MIT AKTIVER LASERTHERMOGRAFIE

Philipp Peter Breese<sup>1</sup>, Tina Becker<sup>1</sup>, Simon Oster<sup>1</sup>, Christian Metz<sup>2</sup>,  
Simon J. Altenburg<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin  
<sup>2</sup> THETASCAN GmbH, Dinslaken

www.bam.de

## Übersicht

### Einführung Additive Fertigung

**3D-Druck: Additive Fertigung (AM) von Metallen**

- Additive Manufacturing (AM) beschreibt das lagenweise Fertigen von 2,5D- und 3D-Bauteilen
  - Designfreiheit für hochgradig optimierte Bauteile
  - gezielte Anpassungen schnell möglich
  - Hochgradig digitalisiert (Industry 4.0, Digital Twin...)
  - Nutzung neuartiger Werkstoffe und Legierungen
  - Metall als Pulver oder Draht als Ausgangsmaterial, Aufschmelzen mit Energiequelle (z.B. Laser)
  - damit präzise Schichten möglich
- Nutzung in Luft- und Raumfahrt, Medizin, Automobilbau uvm.

**Vielseitiger Fertigungsprozess mit einer Vielzahl an nutzbarem Vorteilen**

### Herausforderung & Ansatz

**Herausforderung in der Qualitätssicherung - Monitoring vs. Prüfung für L-PBF**

- Verschiedene in-situ Monitoringansätze für L-PBF in Anwendung (Meltpool Monitoring, akustisch, optisch...)
- Betrachten Energieeinbringung und Materialauftrag
- Aber: auch zeitversetzte Defekte möglich (Poren, Risse, Delaminationen...)
- Grund: thermische Spannungen, Aktivitäten in Abkühlphase, Aufschmelzen vorheriger Schichten...
- Unwirtschaftliche ex-situ Prüfung notwendig
- Defekte und Ausschuss erst nach Prozessabschluss identifiziert
- Qualitätssicherung nicht gewährleistet (bes. relevant in Luftfahrt, Medizin etc.)

**Reines in-situ Monitoring nicht ausreichend für vollumfängliche Qualitätssicherung**

### Anlage und Aufbau

**L-PBF Forschungsanlage SAMMIE (Sensor-based AM Maching)**

- Zugang zu Daten, Steuerung, Optik etc. schwierig an kommerzieller L-PBF Maschine (proprietär)
- Deshalb Eigenaufbau für Forschungsziele bei der BAM in Berlin-Adlershof
- IPG Photonics Faserveraser (1070nm, max. 500W)
- Steuerung mit LabVIEW SPS

**Voller Zugriff und volle Kontrolle über Setup, Prozess, Daten und Prüfablauf für L-PBF mit SAMMIE**

### Untersuchungen

**Untersuchungen**

- Prüfung von metallischem Probekörper aus Kalberbeitsstahl mit erodierter Nut (vgl. Bild)
- Zusätzlich un bearbeiteter AM-Probekörper aus Edelstahl 316L mit Hohlstellen nah an der Oberfläche

10mm lang  
max. 50µm tief  
15-50µm breit

- Allied Vision GoldEye CL-033 TEC1
- Sensitiv zwischen 0,3µm - 1,7µm
- 640x512 px², Subwindow 60x50 px²
- 5kHz Framerate, 150µs Belichtungszeit
- 50 mm-Objektiv ergibt ~50µm/px

### Ergebnisse

**Ergebnisse Nut Probekörper**

- Thermogramm pixelweise von Maximum absteigend sortiert (nicht mit flüchtiger Abkühlung zu verwechseln)
- Vorläufig Digital Values logarithmisch dargestellt; reale Temperaturen aktuell nicht notwendig
- Ohne visuelle Nachbearbeitung Nut deutlich sichtbar über komplette Länge

### Zusammenfassung & Ausblick

**Zusammenfassung**

- Monitoring nicht ausreichend für Qualitätssicherung
  - Grund: zeitversetzte Defektentstehung
- Dedizierte in-situ Prüfung mit aktiver Laserthermografie
  - Jeweils von vollendeter Schicht mit defokussiertem Fertigungslaser in On-Axis-Konfiguration
- Erfolgreiche ZIP von Probekörpern in Baukammer; Optimierung notwendig
- Schrittweise Heranführung zur in-situ Anwendung mit Vortest
- Prüfansatz ermöglicht aussagekräftige Qualitätssicherung

## 3D-Druck: Additive Fertigung (AM) von Metallen

- Additive Manufacturing (AM) beschreibt das lagenweise Fertigen von 2,5D- und 3D-Bauteilen
  - Designfreiheiten für hochgradig optimierte Bauteile
  - gezielte Anpassungen schnell möglich
  - Hochgradig digitalisiert (Industry 4.0, Digital Twin...)
  - Nutzung neuartiger Werkstoffe und Legierungen
- Metall als Pulver oder Draht als Ausgangsmaterial, Aufschmelzen mit Energiequelle (z.B. Laser)
  - damit präzise Schichten möglich

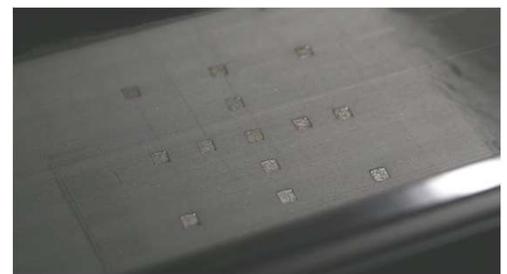
Bsp. Brennerspitze (Siemens) [1]



**Vielseitiger Fertigungsprozess mit einer Vielzahl an nutzbaren Vorteilen**

## Laser Powder Bed Fusion (L-PBF)

- Verschiedene Metal-AM-Prozesstypen
  - Größter Marktanteil klar für Laser Powder Bed Fusion (L-PBF)
  - aktuell höchstes TRL (Technology Readiness Level)
- Weitere Namen: PBF-LB/M, SLM (Selective Laser Melting), DMLS (Direktes Metall-Laser-Schmelzen)
- Laser schmilzt Pulverschicht punktuell auf → Bauplattform wird abgesenkt → neue Pulverschicht wird aufgebracht → Wiederholung der Schritte
- Korrekte Prozessparameter extrem wichtig für Qualität des gefertigten Bauteils



**Vergleichsweise neuartiger, komplexer Prozess mit Vielzahl an Prozess- und Einflussfaktoren**

[2]

## Herausforderung in der Qualitätssicherung - Monitoring vs. Prüfung für L-PBF



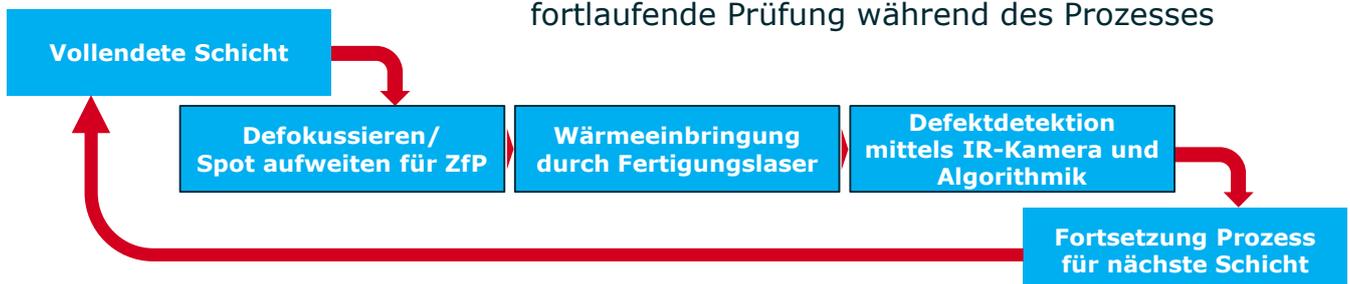
- Verschiedene in-situ Monitoringansätze für L-PBF in Anwendung (Meltpool Monitoring, akustisch, optisch...)
- Betrachten Energieeinbringung und Materialauftrag
- ⚠️ • Aber: auch zeitversetzte Defekte möglich (Poren, Risse, Delaminationen...)
- Grund: thermische Spannungen, Aktivitäten in Abkühlphase, Aufschmelzen vorheriger Schichten...
- ⚡ • Unwirtschaftliche ex-situ Prüfung notwendig
- Defekte und Ausschuss erst nach Prozessabschluss identifiziert
- Qualitätssicherung nicht gewährleistet (bes. relevant in Luftfahrt, Medizin etc.)

**Reines in-situ Monitoring nicht ausreichend für vollumfängliche Qualitätssicherung**

## Lösungsansatz - aktive in-situ Laserthermografie



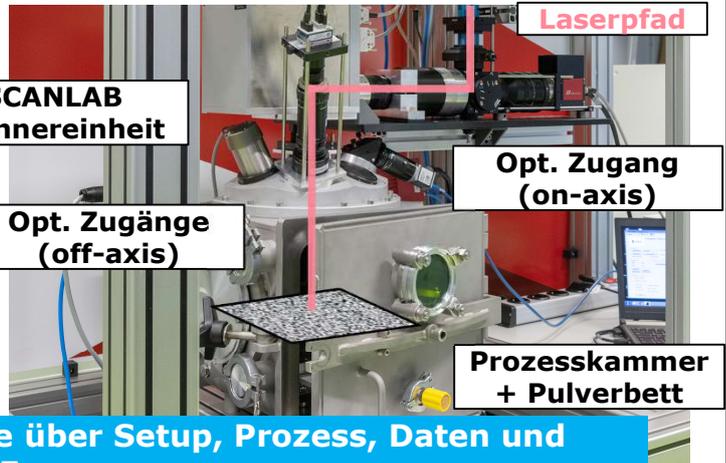
- Prüfung einer vollendeten Schicht mit vorhandenem Fertigungslaser für fortlaufende Prüfung während des Prozesses



- Zusätzl. Optische Tomografie (OT): VIS-Langzeitbelichtung für TT-Vorauswahl
- Untersuchung innerhalb des ZIM-Projekts ATLAMP (Aktive Thermografie mit Laseranregung zur in-situ Detektion von Fehlern während der Additiven Fertigung im Metall-Pulverbettverfahren)
- BAM Berlin und THETASCAN GmbH Dinslaken

## L-PBF Forschungsanlage SAMMIE (Sensor-based AM Machine)

- Zugang zu Daten, Steuerung, Optik etc. schwierig an kommerzieller L-PBF Maschine (proprietär)
- Deshalb Eigenaufbau für Forschungszwecke bei der BAM in Berlin-Adlershof



- IPG Photonics Faserlaser (1070 nm, max. 500 W)
- Steuerung mit LabVIEW SPS

**Voller Zugriff und volle Kontrolle über Setup, Prozess, Daten und Prüfablauf für L-PBF mit SAMMIE**

## Aufbau und Randbedingungen

SWIR-Kamera



SWIR-Objektiv

Longpass-Filter  
> 1175 nm

Notch-Filter  
1070 nm

Beamsplitter



Fokuseinheit

Scaneinheit

Laser  
IR-Signal

Laserglas

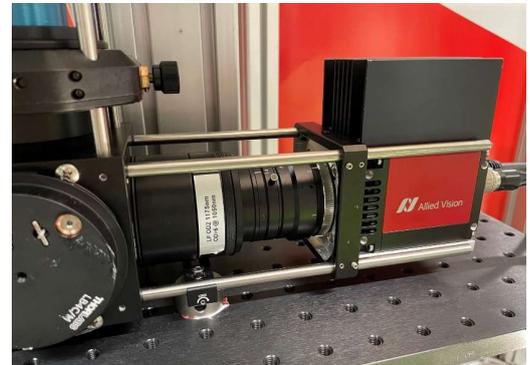
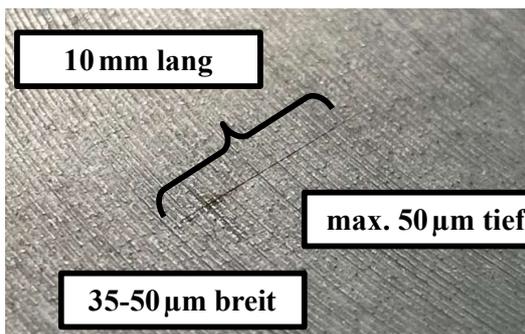
AM-Bauteil

Prozesskammer

- Beamsplitter reflektiert Laser, transmittiert VIS/SWIR
- Damit on-axis Beobachtungen im Strahlengang möglich
  - kein dedizierter optischer Zugang notwendig
  - hohe Framerates möglich durch kleinen Bildausschnitt
  - Unabhängigkeit für verschiedene kommerzielle AM-Maschinen
- Aber: Transmissionsverhalten von optischem Weg macht Betrachtungen oberhalb von SWIR nicht möglich
  - Einschränkung für ZfP und Defekterkennung

## Untersuchungen

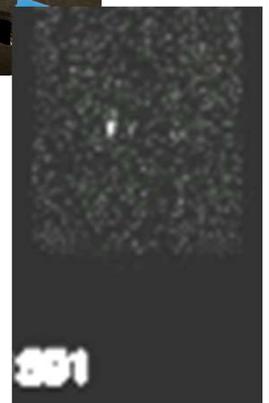
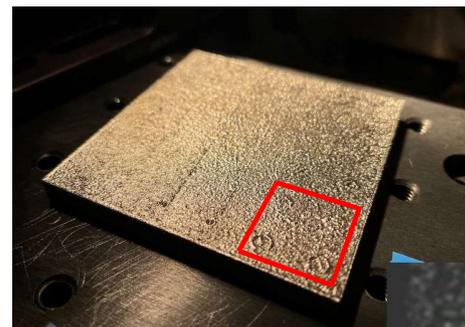
- Prüfung von metallischem Probekörper aus Kaltarbeitsstahl mit erodierter Nut (vgl. Bild)
- Zusätzlich unbearbeiteter AM-Probekörper aus Edelstahl 316L mit Hohlstellen nah an der Oberfläche



- Allied Vision Goldeye CL-033 TEC1
- Sensitiv zwischen  $0,9\ \mu\text{m}$  -  $1,7\ \mu\text{m}$
- $640 \times 512\ \text{px}^2$ , Subwindow  $60 \times 50\ \text{px}^2$
- 5 kHz Framerate,  $150\ \mu\text{s}$  Belichtungszeit
- 50 mm-Objektiv ergibt  $\approx 50\ \mu\text{m}/\text{px}$

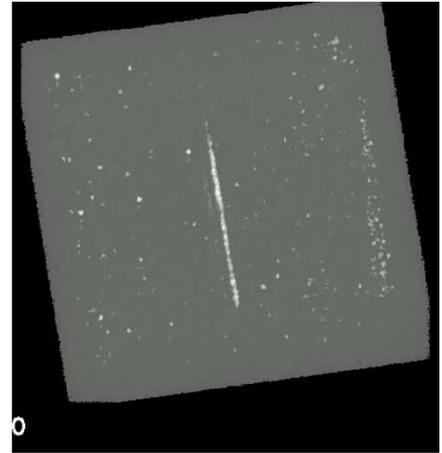
## Untersuchungen

- Oberfläche Probekörper auf Bauebene
- Durchmesser Laserspot 1,1 mm  
→ Faktor 25 zu Bauprozess ( $\approx 45\ \mu\text{m}$ )
- 30 W Laserleistung mit 200 mm/s Scangeschwindigkeit
- Quadratisches Muster ( $15 \times 15\ \text{mm}^2$ ); 60 Laserbahnen monodirektional
- Laserbelichtung (Prüfdauer)  $\sim 4,5\ \text{s}$ ; Prüfgeschwindigkeit  $0,5\ \text{cm}^2/\text{s}$
- Energie pro Fläche  $60\ \text{J}/\text{cm}^2$
- Informationen aus Einzelbildern sehr begrenzt  
→ Datenzusammenführung basierend auf Scannerpositionen für Prüfbereichdarstellung



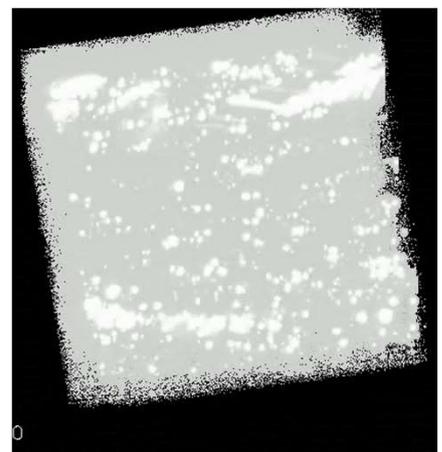
## Ergebnisse Nut Probekörper

- Thermogramm pixelweise vom Maximum absteigend sortiert (nicht mit flächiger Abkühlung zu verwechseln)
- Vorläufig Digital Values logarithmisch dargestellt; reale Temperaturen aktuell nicht notwendig
- Ohne visuelle Nachbearbeitung Nut deutlich sichtbar über komplette Länge



## Ergebnisse AM-Probekörper

- Rauigkeiten an Oberfläche des AM-Bauteils liefern Hotspots  
→ Abkühlungskurve zu betrachten
- Überdeckte Löcher teilweise auszumachen
- Unebenheiten in AM-Probekörper ebenfalls sichtbar
- Anpassungen in Parametern und Strategie für Verbesserungen erforderlich



**Defekterkennung durch aktive on-axis Laserthermografie im SWIR-Bereich durchführbar - Optimierungen aber notwendig**

## Zusammenfassung

Laser Powder  
Bed Fusion  
L-PBF

### 🚩 Monitoring nicht ausreichend für Qualitätssicherung

→ Grund: zeitversetzte Defektentstehung

### ✔️ Dedizierte in-situ Prüfung mit aktiver Laserthermografie

→ Jeweils von vollendeter Schicht mit defokussiertem Fertigungslaser in On-Axis-Konfiguration

- ✓ Erfolgreiche ZfP von Probekörpern in Baukammer; Optimierung notwendig
- ✓ Schrittweise Heranführung zur in-situ Anwendung mit Vortests
- ✓ Prüfansatz ermöglicht aussagekräftige Qualitätssicherung

## Roadmap für aktive in-situ AM-Laserthermografie

- Schrittweises Vorantreiben des Prüfansatzes für optimale Schaffung von Grundlagen und Zusammenhängen

### Abbildungsabweichungen

- Überprüfung von Abweichungen
- Herausrechnen von potentiellen optischen Verzügen im Thermogramm

### Parameter verbessern

- Anregung und Recording optimieren
- Kontrast steigern und gleichzeitig Oberflächeneinfluss (Hotspots) mindern

### Detektion von verdeckten Defekten

- Andere Ansätze als Flying Spot nötig
- Step Scanning oder quasi-flächige Erwärmung (max. Scangeschwindigkeit)

## Roadmap für das Projekt ATLAMP

- Schrittweise Anwendung auf Prozess und in kommerziellen Anlagen für industrielle Nutzbarmachung

### Prüfung von AM-Probekörpern

- bekannte (evtl. verdeckte) Fehlstellen
- verschiedene Defektarten
- künstliche und natürliche Defekte

### Übertragung auf eigentlichen L-PBF Prozessablauf

- Prüfung entstehender Defekte
- Zuhilfenahme Optische Tomografie (OT)

### Einsatz auf kommerziellen Anlagen

- Adaptivität gewährleisten
- Optimierung hinsichtlich Aufwand und Kosten

## Vielen Dank für die Aufmerksamkeit! Fragen?

### Kontakt:

Philipp Peter Breese, M.Sc.  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Telefon: +49 30 8104-4670  
Mobil: +49 151 67595971  
E-Mail: [philipp-peter.breese@bam.de](mailto:philipp-peter.breese@bam.de)

[www.bam.de](http://www.bam.de)

## Referenzen

---

- [1] Biedermann, Manuel & Meboldt, Mirko. (2020). Computational design synthesis of additive manufactured multi-flow nozzles. Additive Manufacturing. 35. 101231. 10.1016/j.addma.2020.101231.
- [2] Research Association 3-D MID. 2022. Selective Laser Melting (SLM) Process.  
<https://www.youtube.com/watch?v=WzZP4vuptQE>