

# Materialcharakterisierung bei der Additiven Fertigung mittels Optischer Tomografie

Alexander LADEWIG<sup>1</sup>, Günter ZENZINGER<sup>1</sup>, Joachim BAMBERG<sup>1</sup>, Volker CARL<sup>2</sup>

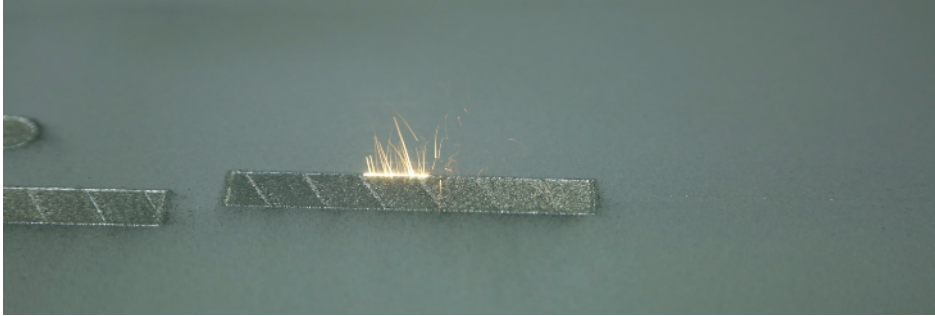
<sup>1</sup> MTU Aero Engines AG Dachauer Straße 665, 80995 München

<sup>2</sup> Carl IR Messtechnik, Dinslaken

Kontakt: alexander.ladewig@mtu.de

## Kurzfassung

Das pulverbettbasierte, selektive Laserschmelzen entwickelt sich mit großer Geschwindigkeit und stellt eine vielversprechende Technologie zur Herstellung komplexer Strukturen dar. Auf dieser Basis können wesentliche Verbesserungen an Bauteilen für die Luftfahrt erzielt werden. Während des Aufbaus von Bauteilen können jedoch Prozessabweichungen zu Materialdefekten führen. Diese sind durch konventionelle ZFP-Verfahren kaum, oder nur mit großem Aufwand zu detektieren und können schwerwiegenden Einfluss auf die Materialeigenschaften nehmen. Zur Detektion dieser Prozessabweichungen wurde ein neues online Prozessüberwachungssystem – die Optische Tomografie (OT) – entwickelt. Die von der Prozesszone emittierte thermische Strahlung wird dabei mittels einer hochauflösenden Kamera erfasst und im Anschluss automatisiert bewertet. Auf diesem Weg ist es der OT möglich, sowohl systematische, als auch lokal auftretende Prozessabweichungen zu detektieren. Auf Basis von Korrelationen zwischen Materialfehlern und zugehörigen OT Signalen, lassen sich Rückschlüsse auf die resultierende Materialqualität eines Aufbauprozesses ziehen. Inhalt des Vortrages ist das Prinzip der OT, Vorgehensweisen zur Ermittlung von Korrelationen, sowie mögliche Anwendungen anhand von Beispielen.



## Materialcharakterisierung bei der Additiven Fertigung mittels Optischer Tomografie

Symposium Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung

A. Ladewig, G. Zenzinger, J. Bamberg, V. Carl

28.11.2017, Berlin

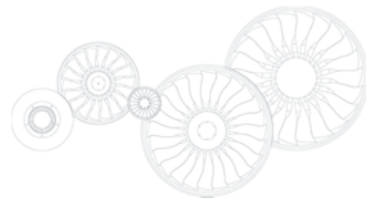
AM-Fertigungsprozesskette

Optische Tomographie

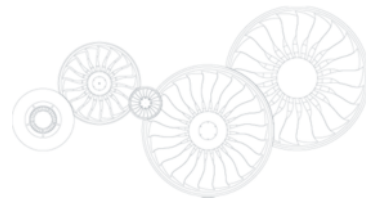
Detektion von  
Prozessabweichungen

Statistischer Fehlernachweis

Von 2D zu 3D



- AM-Fertigungsprozesskette
- Optische Tomographie
- Detektion von Prozessabweichungen
- Statistischer Fehlernachweis
- Von 2D zu 3D



## MTU-Roadmap für Additive Manufacturing Phase 2 – 3: Klassifikation in Kategorien

	Kategorie 0	Kategorie 1	Kategorie 2	Kategorie 3	Kategorie 4	Kategorie 5	Kategorie n
MTU-Portfolio	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bolts</li> <li>▪ Small Sheets</li> <li>▪ Levers</li> <li>▪ Bosses</li> <li>▪ Inserts</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Seal Carrier</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Outer Air Seals</li> <li>▪ Shrouds</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Inner Air Seals</li> <li>▪ Interstage Seals</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Guide Vanes</li> <li>▪ Blades</li> <li>▪ Honeycombs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Panels</li> <li>▪ Fairings</li> <li>▪ Bearing Cases</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ New Design</li> <li>▪ Gamma-strengthening materials</li> </ul>
Supply Bus.			<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Race engine parts</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Commercial engine Parts</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Guide vanes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Injection nozzles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Injection nozzles</li> </ul>

Qualitätsanforderungen

## Aufbau einer additiven Fertigung @ MTU



### Additive Fertigung @ MTU

- 6 EOS M280
- 2 EOS M290
- 1 EOS M400x4
- **Gesamt 9 Anlagen**

### Materialien

- IN718
- MAR-M509
- Stahl
- Titan

### Voraussetzungen für den Aufbau einer additiven Fertigung

- ▶ Steigende Aufbaurrate ohne eine Veränderung der Materialdaten
- ▶ Optimierung der Anlagen bei konstanter Qualität
- ▶ Kontinuierliche Maschinenauslastung

28.11.2017

Materialcharakterisierung bei der Additiven Fertigung mittels Optischer Tomografie

5

© MTU Aero Engines AG. The information contained herein is proprietary to the MTU Aero Engines group companies.

## Luftfahrtzugelassene Prozesskette bei der MTU



28.11.2017

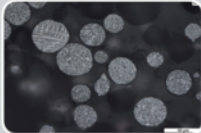
Materialcharakterisierung bei der Additiven Fertigung mittels Optischer Tomografie

6

© MTU Aero Engines AG. The information contained herein is proprietary to the MTU Aero Engines group companies.

## Qualitätssicherung

### QS-Konzept



#### Rohmaterial / Pulver

##### Lieferant

- Pulverzertifikate

##### MTU

- Wareneingangsprüfung
- Requalifizierung von gebrauchtem Pulver



#### QS-Produktionslinie

##### Systemeignung

- Total Productive Maintenance
- Maschinen-Kalibrierzyklen
- Maschinenzulassung



#### QS-Prozess

##### Prozess Monitoring

- Optische Tomografie
- EOState
- Sauerstoff
- Druck
- Z-Achsen-Positionierung
- Kollisionsüberwachung bei der Beschichtung
- Plattform Temperatur



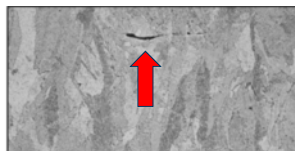
#### QS-Bauteil

##### Bauteilprüfung / ZFP

- Sichtprüfung
- FPI
- Röntgen
- CMM / Optische Messtechnik
- Probekörper
- Ausfallmuster

## Problem: Bindefehler

- Prozessabweichungen beim SLM können zu Bindefehlern führen



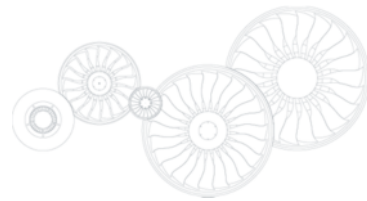
0,1 mm

Metallografischer Schliff

- Innenliegender Fehler → **Kein FPI**
- 3D Bauteilgeometrie → **Kein Ultraschall**
- Sehr klein im Vergleich zur Bauteildicke → **Kein Röntgen**

Online-Prozessüberwachung erforderlich!

- AM-Fertigungsprozesskette
- **Optische Tomographie**
- Detektion von Prozessabweichungen
- Statistischer Fehlernachweis
- Von 2D zu 3D

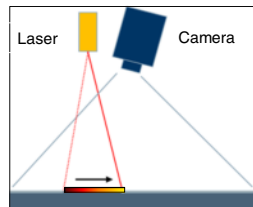


## Optische Tomografie - Grundprinzip



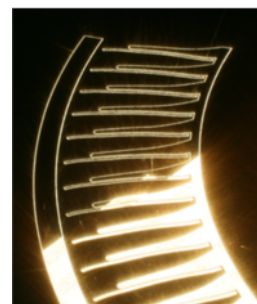
Langzeitbelichtung des Stadtverkehrs

→ Verkehrsaufkommen



Helligkeit im Bild entspr. der Strahlung x Zeit

→ Messung des Energieeintrags / Streckenenergie



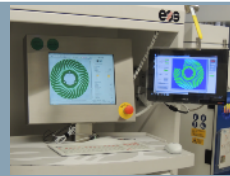
Langzeitbelichtung bei der Additiven Fertigung

→ Energiemenge

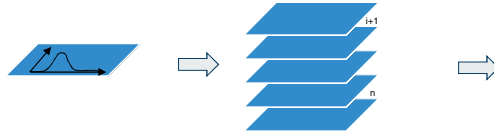
## Optische Tomografie - Grundprinzip

### Monitoring von:

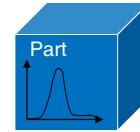
- Prozessbedingungen
- Pulverauftrag
- Prozessparametern
- Prozessabweichungen
- ...



### 2D Überwachung und Auswertung je Lage



### Bauteileigenschaften



### Typische Fehler:



Bindefehler



Poren



Risse



Einschlüsse

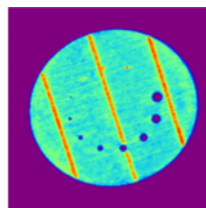
28.11.2017

Materialcharakterisierung bei der Additiven Fertigung mittels Optischer Tomografie

© MTU Aero Engines AG. The information contained herein is proprietary to the MTU Aero Engines group companies.

11

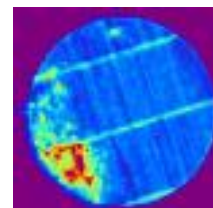
## Optische Tomographie - Eigenschaften



Bauteilgeometrie



Prozessparameter



Prozessabweichungen

- Alle mit hoher geometrischer Auflösung (0.1 mm x 0.1 mm)
- Erfassung Lage für Lage ohne Informationsverlust

→ Optische 3D-Charakterisierung des gesamten Baujobs

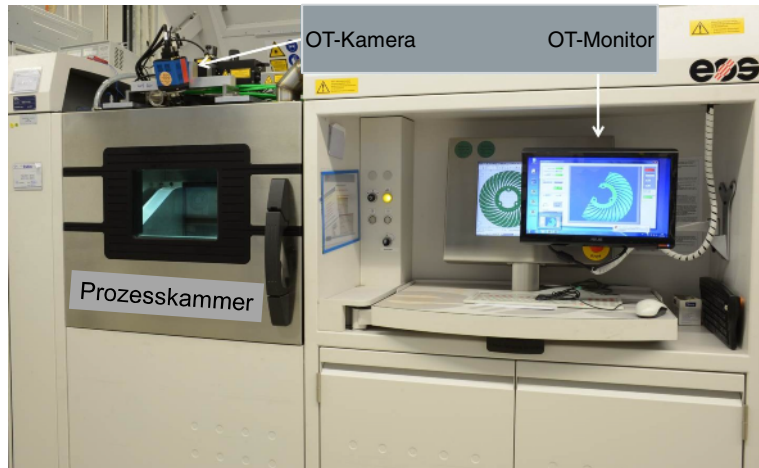
28.11.2017

Materialcharakterisierung bei der Additiven Fertigung mittels Optischer Tomografie

© MTU Aero Engines AG. The information contained herein is proprietary to the MTU Aero Engines group companies.

12

## AM-Maschine ausgestattet mit OT-System @ MTU

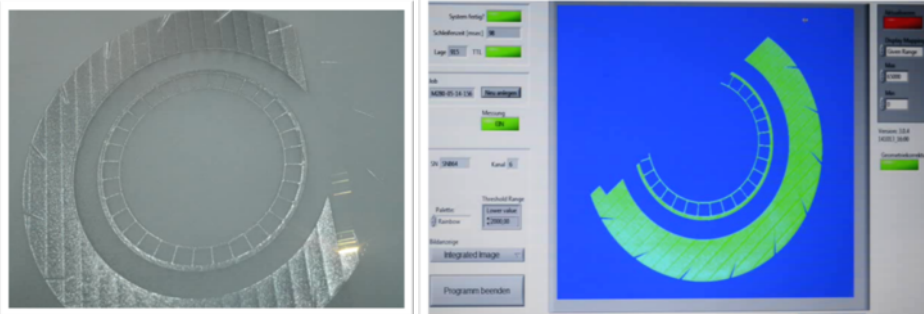


28.11.2017

Materialcharakterisierung bei der Additiven Fertigung mittels Optischer Tomografie  
© MTU Aero Engines AG. The information contained herein is proprietary to the MTU Aero Engines group companies.

13

## Optische Tomographie - Prozessaufnahme



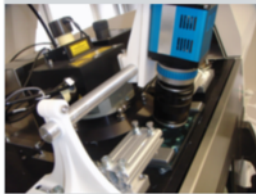
28.11.2017

Materialcharakterisierung bei der Additiven Fertigung mittels Optischer Tomografie  
© MTU Aero Engines AG. The information contained herein is proprietary to the MTU Aero Engines group companies.

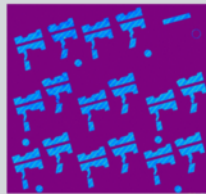
14



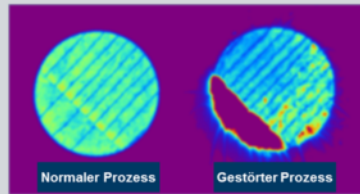
## Optische Tomographie – Anwendung



OT-System auf allen Anlagen installiert (außer M400)

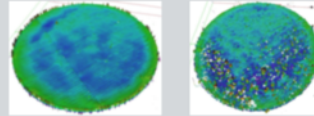


Prozessüberwachung aller gebauter Lagen



Normaler Prozess

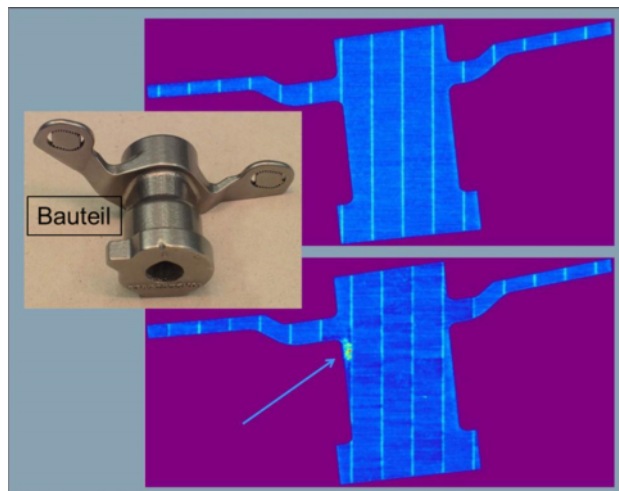
Gestörter Prozess



Korrelation zwischen OT Anzeigen und Materialfehlern

- ▶ Vollständige Überwachung aller Lagen
- ▶ OT wurde erfolgreich für die ersten Serienteile eingeführt

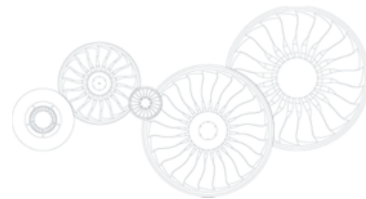
## Optische Tomographie – Beispiel Bauteil mit und ohne Anzeige



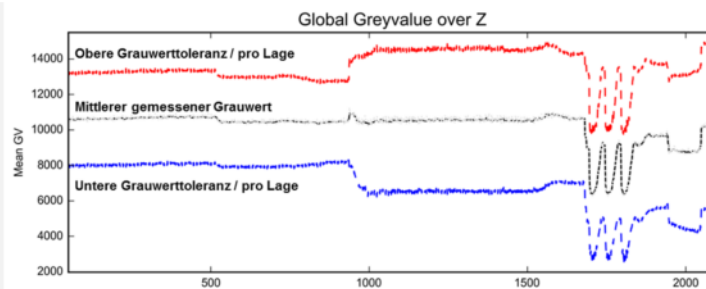
OT-Bild ohne Anzeige

OT-Bild mit Anzeige

- AM-Fertigungsprozesskette
- Optische Tomographie
- Detektion von Prozessabweichungen
- Statistischer Fehlernachweis
- Von 2D zu 3D



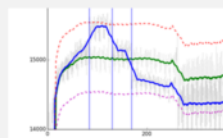
## Überwachung systematischer Abweichungen



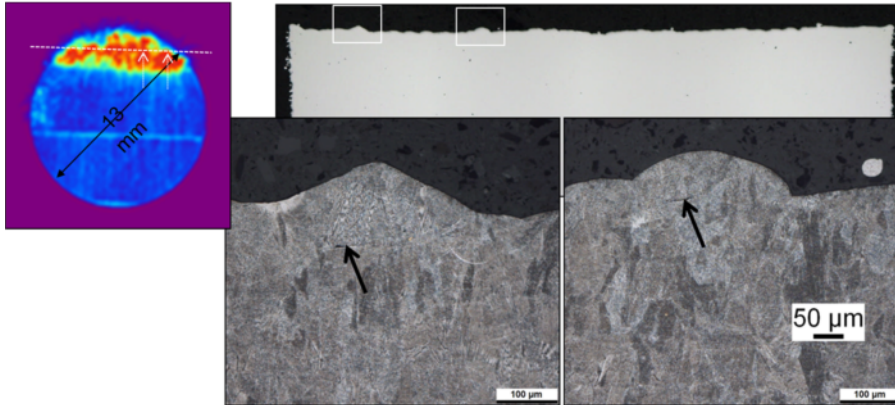
OT zeigt bereits kleinste Änderungen im Energieeintrag

Wird genutzt zur Überwachung von:

- Reproduzierbarkeit
- Vergleichbarkeit zwischen Teilen, Jobs und Maschinen
- Prozessstabilität



## Bindefehler ausgelöst durch Prozessabweichungen

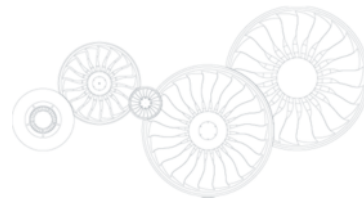


28.11.2017

Materialcharakterisierung bei der Additiven Fertigung mittels Optischer Tomografie  
© MTU Aero Engines AG. The information contained herein is proprietary to the MTU Aero Engines group companies.

19

- AM-Fertigungsprozesskette
- Optische Tomographie
- Detektion von Prozessabweichungen
- Statistischer Fehlernachweis
- Von 2D zu 3D



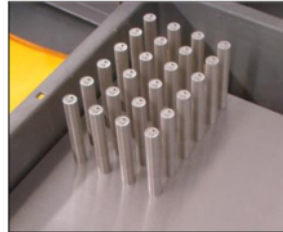
28.11.2017

Materialcharakterisierung bei der Additiven Fertigung mittels Optischer Tomografie  
© MTU Aero Engines AG. The information contained herein is proprietary to the MTU Aero Engines group companies.

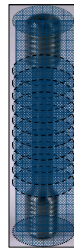
20

## Vorgehen zur POD-Evaluierung für Bindefehler durch OT

Schritt	Aktion
1	Herstellung von zylindrischen Proben mit und ohne Prozessabweichungen und Überwachung des Prozesses durch OT
2	Herstellung von Zugprobengeometrie
3	Computertomographie zur Detektion von Bindefehlern und Poren
4	<b>Zuordnung von CT-Anzeigen und OT-Anzeigen</b>
5	Metallografische Schliffe an einzelnen ausgewählten Proben zur Bestätigung der CT-Ergebnisse
6	<b>Korrelation von OT- und CT-Anzeigen und Berechnung einer POD</b>



Zylindrische Proben auf Bauplattform



- Zylindrischer Probekörper mit provozierten Prozessabweichungen in 10 definierten Lagen
- Provokation durch Störung der Schutzgasströmung
- 120 Proben hergestellt

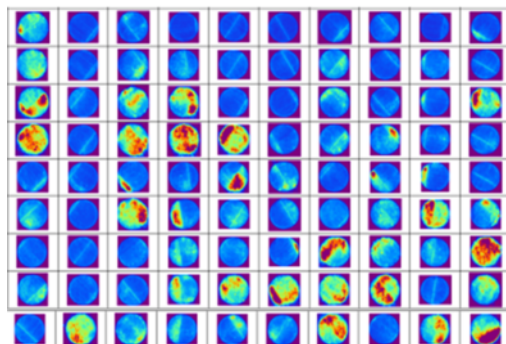
28.11.2017

Materialcharakterisierung bei der Additiven Fertigung mittels Optischer Tomografie

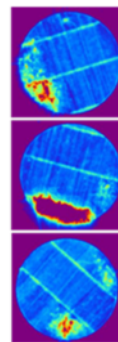
21

© MTU Aero Engines AG. The information contained herein is proprietary to the MTU Aero Engines group companies.

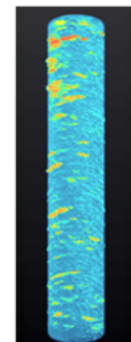
## OT-Bilder mit Anzeigen in den gestörten Lagen



Viele unterschiedliche Anzeigen



Detail



3D-Bild

28.11.2017

Materialcharakterisierung bei der Additiven Fertigung mittels Optischer Tomografie

22

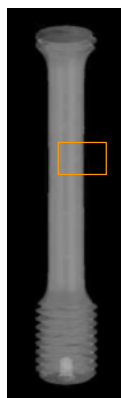
© MTU Aero Engines AG. The information contained herein is proprietary to the MTU Aero Engines group companies.

## CT an den Proben

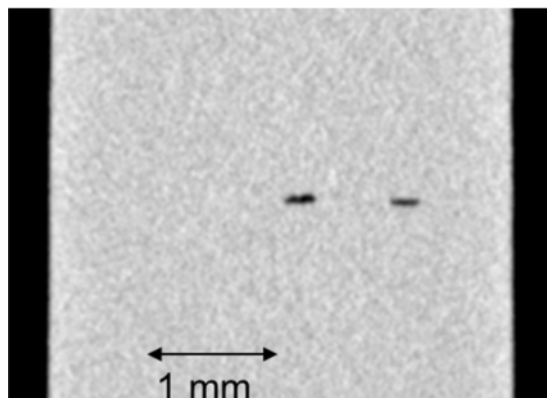
- Durchmesser Reduktion der Probekörper für verbesserte Auflösung
- Geometrie auch nutzbar für Zugversuch
- System vltomexls
  - bis zu 5  $\mu\text{m}$  Auflösung erzielt



## CT-Bilder der Proben



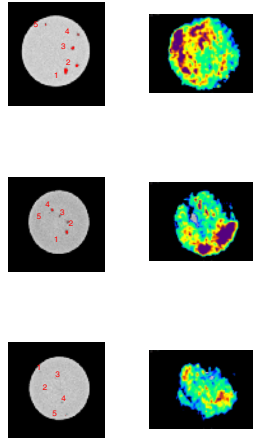
CT-Bild



Bindfehler werden sichtbar

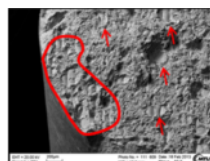
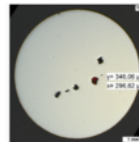
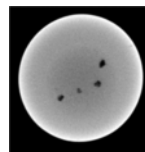
## Vergleich von CT- und OT-Bildern

- 400 beeinflusste Lagen wurden verglichen
  - OT-Algorithmus basierend auf Helligkeitswerten, der Größe und einem Schwellwert wurde für die Auswertung entwickelt → Liefert Auswertemerkmal
- OT-Auswertemerkmale korrelieren bis zu minimalen Fehlergrößen von 50 µm



## Validierung der CT-Daten

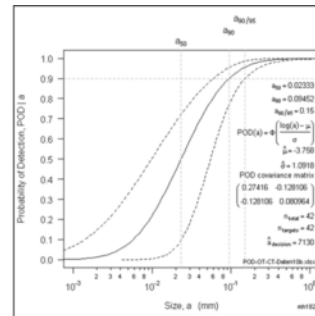
- CT-Bild der beeinflussten Lage
- Metallografischer Schliff
- Zugversuch



→ Alle CT-Anzeigen bestätigt

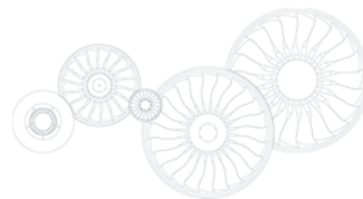
## POD-Ergebnis

- Korrelation zwischen OT-Merkmal und Fehlergröße existiert
- Probability of detection (POD) wurde berechnet
- Empfindlichkeit: 150  $\mu\text{m}$  Fehlergröße @ 90 / 95 % POD
- Automatische Anzeigenerkennung und Klassifikation entwickelt
- Online Prüfung durch Prozessbeobachtung erzielt

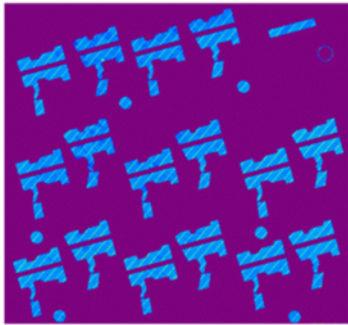


→ *“Die Optische Tomographie ist somit ein qualifiziertes Prüfmittel für Bindefehler.”*

- AM-Fertigungsprozesskette
- Optische Tomographie
- Detektion von Prozessabweichungen
- Statistischer Fehlernachweis
- Von 2D zu 3D

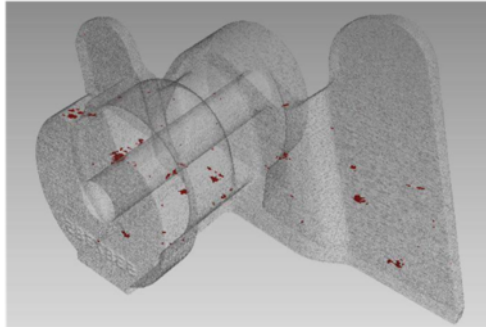


## Von 2D- zu 3D-Darstellung



2D-OT-Bild von Boroskopaugen

2D-OT-Bildstapel verrechnet zu 3D-Darstellung durch CT- Software



3D-OT-Bild mit Anzeigen verursacht durch Strömungsinhomogenität

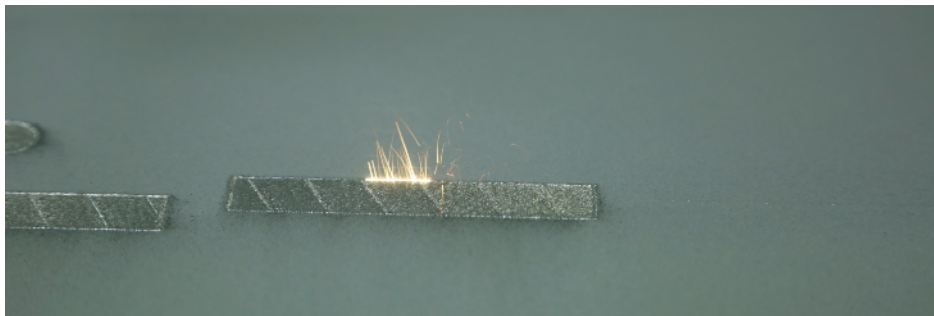
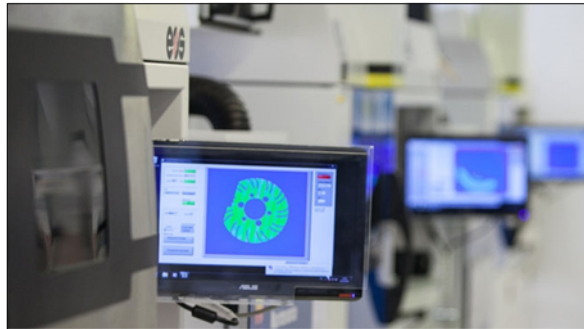
## Von 2D- zu 3D-Darstellung





## Ausblick

- OT-Prozessüberwachung auf allen unseren Anlagen installiert
- 100 % Prozessüberwachung von allen Baujobs
- EOSTATE Exposure OT für M290-Anlagen erhältlich bei EOS



**Vielen Dank für ihre Aufmerksamkeit!**