

# Materialcharakterisierung mittels Ultraschall bei der additiven Fertigung

Hans RIEDER <sup>1</sup>, Martin SPIES <sup>1</sup>, Joachim BAMBERG <sup>2</sup>, Benjamin HENKEL <sup>2</sup>,  
Simon MÜLLER <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken

<sup>2</sup> MTU Aero Engines AG, München

## Kurzfassung

Additive Fertigungsverfahren erlauben die Herstellung von Bauteilen durch schichtweises, lokales Erschmelzen eines pulverförmigen Ausgangswerkstoffes. Im Vergleich zur konventionellen, subtraktiven Fertigung bieten diese Verfahren eine wesentlich höhere Designfreiheit und besitzen ein großes Potenzial hinsichtlich der Ressourcen. Ausgehend von einer CAD-Darstellung des zu fertigenden Bauteils ist die additive Fertigung auch für die Herstellung geometrisch komplizierter Triebwerksbauteile sehr interessant.

Durch lokales Erschmelzen mit einem Laserstrahl, dem sogenannten Selective Laser Melting (SLM), konnten bereits Triebwerksbauteile aus der warmfesten Nickellegierung Inconel 718 hergestellt werden. Zur Qualitätssicherung werden verschiedene Untersuchungen - online und offline - durchgeführt. Dabei werden werkstoffwissenschaftliche (Metallographie, Zugversuche) und zerstörungsfreie Verfahren eingesetzt. Online werden Messungen mit der Optischen Tomographie und mittels Ultraschall durchgeführt.

In diesem Beitrag berichten wir über Untersuchungen, die wir im Hinblick auf den Einfluss des Prozessparameters ‚Laserenergie‘ auf die Mikrostruktur des gefertigten Bauteils durchgeführt haben. Es zeigte sich, dass die online aufgezeichneten A-Scans Rückschlüsse auf den Fertigungsprozess zulassen. Zur Validierung der Ultraschall-Ergebnisse wurden metallographische und röntgenographische Untersuchungen durchgeführt. Offline-Messungen zeigen darüber hinaus das Potential zur Charakterisierung von Anisotropien und E-Modul-Variationen. Auf Basis der erzielten Ergebnisse entwickeln wir in einem nächsten Schritt das Konzept eines smarten, additiv hergestellten Ultraschall-Testkörpers zur Online-Prozesskontrolle und Offline-Materialcharakterisierung.

---

## Materialcharakterisierung mittels Ultraschall bei der additiven Fertigung

---

DACH-Tagung  
Salzburg, 11.-13.Mai 2015

---

### **Hans Rieder\*, Martin Spies\***

Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP,  
Campus E3 1, 66123 Saarbrücken

### **Joachim Bamberg, Benjamin Henkel, Simon Müller**

MTU Aero Engines AG, Dachauer Strasse 665, 80995 München

\*Teile der vorgestellten Ergebnisse entstanden am Fraunhofer ITWM, Kaiserslautern

---

© Fraunhofer



---

## Materialcharakterisierung mittels Ultraschall bei der additiven Fertigung

---

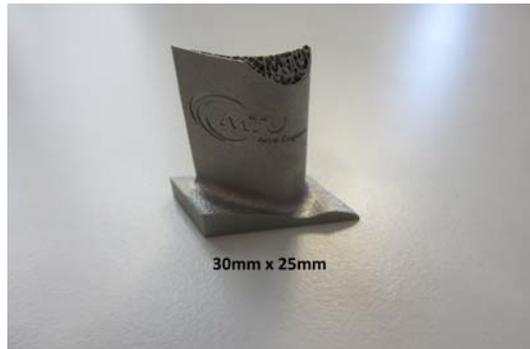
- Hintergrund - MTU
  - Selective Laser Melting – Werkstoffe Ti-6-4 und **IN718**
  - Ultraschall-Monitoring an ausgewählten Testkörpern
  - Untersuchung der Gefügestruktur
  - Ausblick: Smart SLM-Testblock
- 

© Fraunhofer



## Additive Manufacturing

- Rapid Prototyping: seit etwa 25 Jahren in Forschung und Entwicklung
- Additive Manufacturing (AM) für die Herstellung metallischer Bauteile: seit ca. 10 Jahren



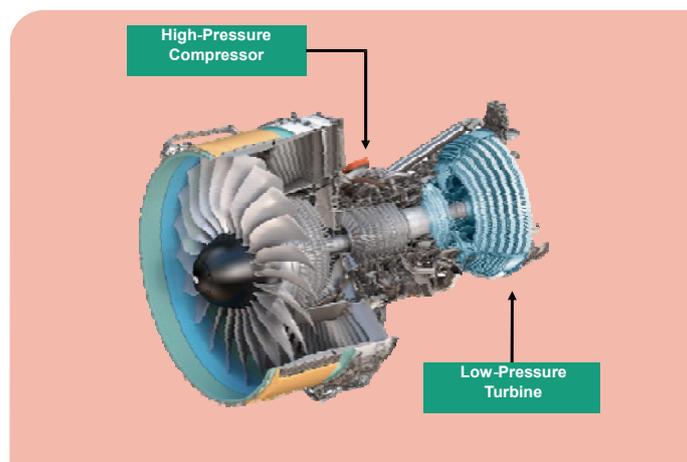
© Fraunhofer



Zertifiziertes Managementsystem  
am Fraunhofer IZFP Saarbrücken



## MTU Aero Engines - größter Lieferant von Sub-Systemen für Triebwerke



© Fraunhofer



Zertifiziertes Managementsystem  
am Fraunhofer IZFP Saarbrücken



# Herausforderungen

**Treibstoffreduktion**

**Gewichtsreduktion**

**Kostenreduktion**



© Fraunhofer



Zertifiziertes Managementsystem  
am Fraunhofer IZFP Saarbrücken

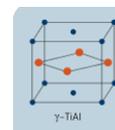


# Herangehensweise

**Innovatives Design** ,Fast rotating turbine'



**Innovatives Material** TiAl-Schaufeln



**Innovative Produktion** Additive Manufacturing



© Fraunhofer



Zertifiziertes Managementsystem  
am Fraunhofer IZFP Saarbrücken



## Boroskop-Auge - erstes MTU-Serienbauteil



Plattform mit 16 Boroskop-Augen und Zugproben

© Fraunhofer



Zertifiziertes Managementsystem  
am Fraunhofer IZP Saarbrücken



## Additive Manufacturing AM – Verfahren und Qualitätssicherung

© Fraunhofer

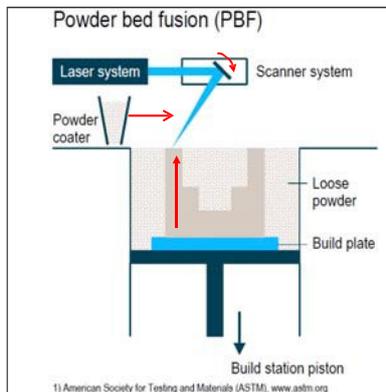


Zertifiziertes Managementsystem  
am Fraunhofer IZP Saarbrücken



## Additive Manufacturing – ‘3D-Drucken’

- Pulverbett-Schweißen ist die am häufigsten eingesetzte Methode für den 3D-Druck metallischer Objekte
- Selective Laser Melting (SLM)



© Fraunhofer

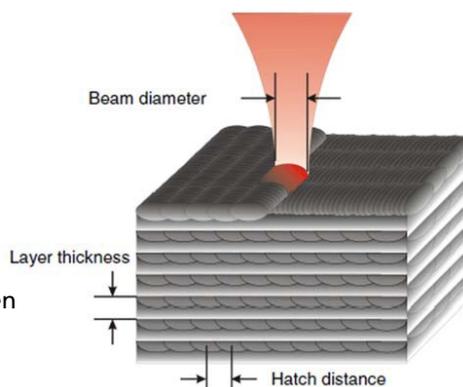


## Additive Manufacturing

### ■ Selective Laser Melting SLM

#### ■ Prinzip

- 3D-CAD-Modell
- Metallpulverbett
- Schicht-für-Schicht-Schmelzen mittels Laser



Quelle: Fraunhofer ILT, Aachen

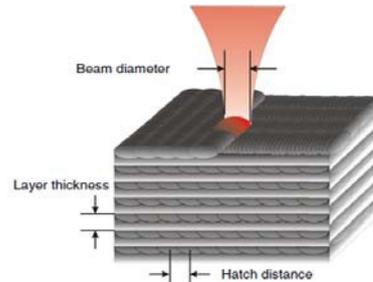
© Fraunhofer



## Selective Laser Melting – typische Parameter



■ EOS M280 SLM



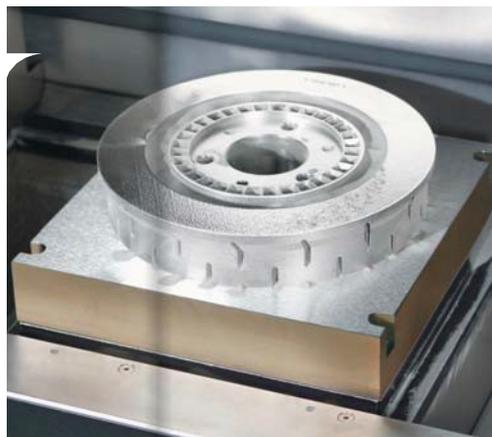
Quelle: Fraunhofer ILT, Aachen

Laser-Leistung	295 W
Scan-Geschwindigkeit	960 mm/s
Linienabstand	0.09 mm
Streifenbreite	5.0 mm
Streifenüberlappung	0.12 mm
Schichtdicke	40 µm

© Fraunhofer



## Selective Laser Melting – Aufbau komplexer Bauteile

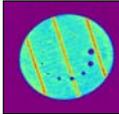
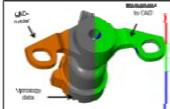


Bauteil auf der Plattform →

© Fraunhofer



## Qualitätssicherung der kompletten Prozesskette

vorher	Pulver <u>Maschine</u>	
während	Prozessparameter <u>Ultraschall-Monitoring</u> <u>Optische Tomographie</u>	
nachher	Metrologie <u>Röntgen &amp; FPI</u> <u>Materialprüfung</u>	

© Fraunhofer



Zertifiziertes Managementsystem  
am Fraunhofer IZFP Saarbrücken



## Ultraschall-Monitoring

© Fraunhofer



Zertifiziertes Managementsystem  
am Fraunhofer IZFP Saarbrücken



## Monitoring-Ansatz

- Ultraschall-Monitoring während des Herstellungsprozesses
  - Einschaltung von der Unterseite der Bauplattform
    - Ziele: Beobachtung/Kontrolle/Detektion
      - der Dynamik des Schichtaufbaus
      - der Interface-Anbindung
      - der lokalen Materialeigenschaften
      - von Eigenspannungen
      - von Porosität

nur ,on-line'  
während des  
Prozesses  
möglich!

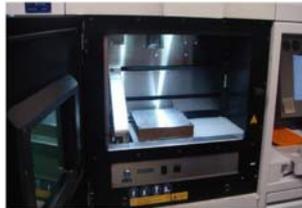
© Fraunhofer



Zertifiziertes Managementsystem  
am Fraunhofer IZFP Saarbrücken



## Bauteil-Herstellung mittels Selective Laser Melting SLM



Vorbereitung des Bau-Jobs

z.B. Aufheizen des Bauraums auf 80° C in  
inertem Gas-Atmosphäre



Laser-Schweißprozess



Aufbau eines Zylinders



© Fraunhofer



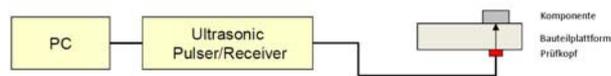
Zertifiziertes Managementsystem  
am Fraunhofer IZFP Saarbrücken



## Monitoring Set-Up

- Problem: restriktive Randbedingungen für die Installation zusätzlicher Komponenten im Bauraum, spezifische ‚Umwelt‘

- Schematischer Aufbau

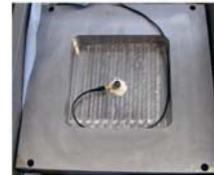


- Versiegelte Installation der HF- und Kontrollkabel unterhalb der Bauplattform



- Prüfkopf ist an der Unterseite der Bauplattform fixiert
  - 10 MHz, ¼ Inch, unfokussiert
  - Koppelmittel
  - Sensor angeklebt

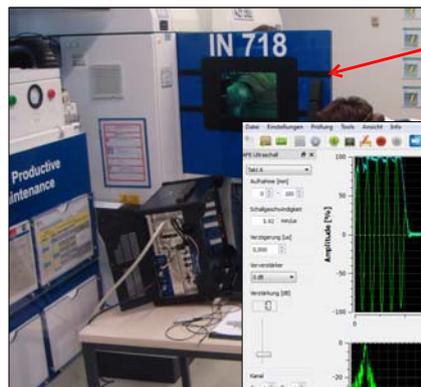
- 10 MHz, ¼ Inch, unfokussiert
- Koppelmittel
- Sensor angeklebt



© Fraunhofer

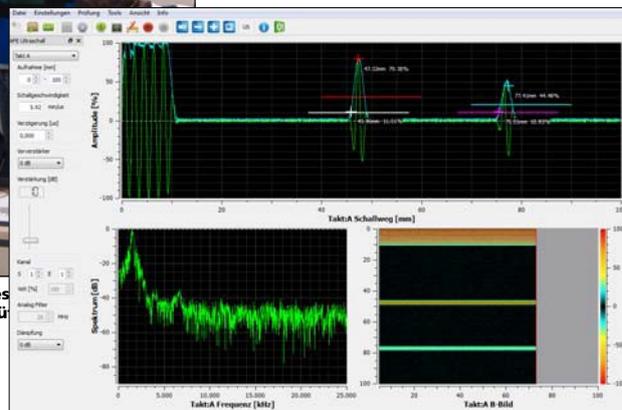


## Ultraschall-Monitoring-System – Integration und Test



offener Bauraum:  
Vorbereitungen für den Baujob

AM-Lab @ MTU Aero Engines  
Integration und Test des Prüfsystems



© Fraunhofer



## Ultrasonic Monitoring – What is Measured?

- Measuring system provides ultrasonic signals with a resolution of down to 4 ns
- Performance per event, e.g. process signal ‚start of weld process‘ for each layer
  - On-line recording of ‚N‘ ultrasound signals within an adjustable time window
  - On-line visualization of the RF-signal
  - Signal processing
  - Signal storage
  - Evaluation is currently done ‚off-line‘
- Requirements to perform the inspection
  - Inspection times of up to 8 hours
  - Up to 1000 data acquisitions (RF-signals) per second
  - Large amounts of data (several Gbytes)

© Fraunhofer



Zertifiziertes Managementsystem  
am Fraunhofer IZFP Saarbrücken



## Demo: Baujob und Ultraschallsignale

© Fraunhofer



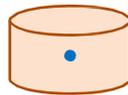
Zertifiziertes Managementsystem  
am Fraunhofer IZFP Saarbrücken



## Aufgebauter Testkörper

- **Zylinder mit innenliegendem Fehler:**

- 20 mm Durchmesser
- 10 mm Höhe
- Pore (sphärisch, 2 mm  $\varnothing$ )



- **Baujob:**

- 40  $\mu\text{m}$  Schichtdicke
- 250 Schichten
- 90 Minuten Bauzeit

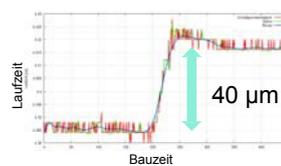


© Fraunhofer

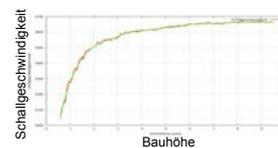


## Ergebnisse

- Auflösung der einzelnen Schweißlage, Aufbau wird kontinuierlich aufgezeichnet



- Ermittlung der lokalen Schallgeschwindigkeit



- Echtzeit-Detektion künstlicher Fehler



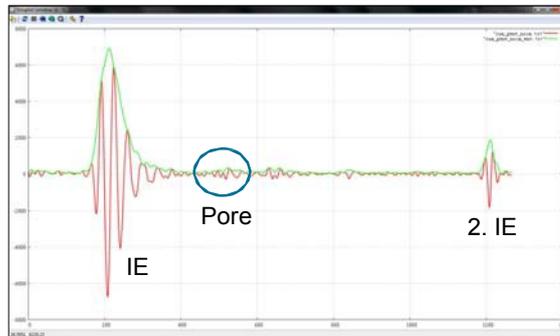
© Fraunhofer



## A-Scan-Darstellung

A\*-Scan = Mittelung aller A-Scans  
des Baujobs

- Rauschreduktion
- nur statische Objekte werden sichtbar (Interface-Echo, Defekte)
- Rückwandechos mittel sich weg
- Pore im A-Scan schlecht sichtbar wg. Ausrichtung des Prüfkopfes



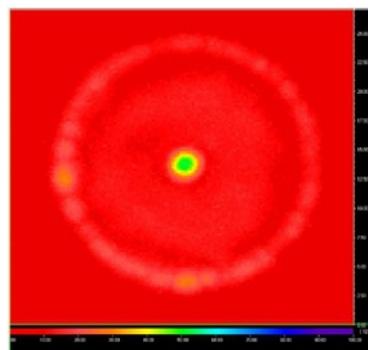
© Fraunhofer



## Off-line Validierung nach Ende des Baujobs

### Immersionprüfung: C-Scan

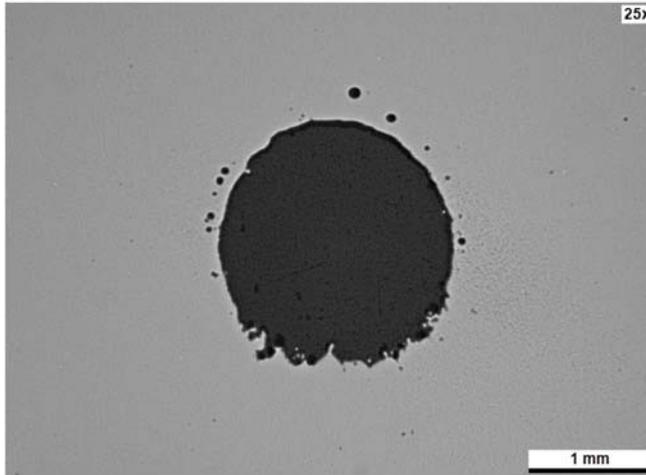
- 10 MHz, 3 Inch Fokus
- Fehlerabbildung
- keine weiteren Anzeigen



© Fraunhofer



## Metallographie Pore



Schliff-Nr.:

Probe 1

Probe Nr.:

1

Ätzmittel:

ungeätzt

Bemerkung:

Probe mit einem Hohlraum

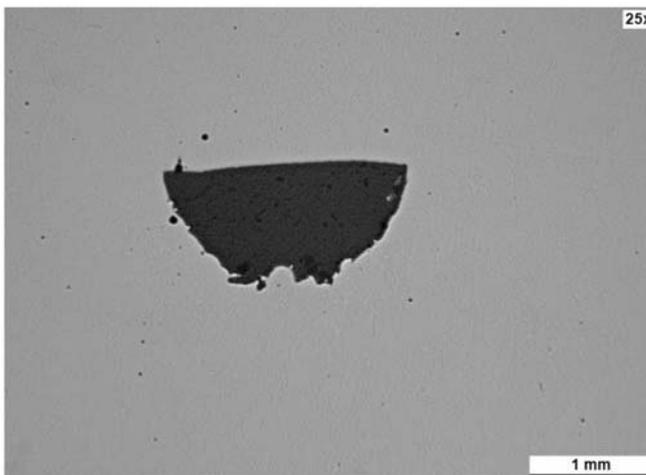
© Fraunhofer



Zertifiziertes Managementsystem  
am Fraunhofer IZFP Saarbrücken



## Metallographie Halbkugel - Kreisscheibenreflektor



Schliff-Nr.:

Probe 2

Probe Nr.:

2

Ätzmittel:

ungeätzt

Bemerkung:

Hohlraum 1

Übersicht

© Fraunhofer



Zertifiziertes Managementsystem  
am Fraunhofer IZFP Saarbrücken



## Untersuchung des Einflusses der Laser-Leistung auf die Ausbildung der Mikrostruktur

© Fraunhofer

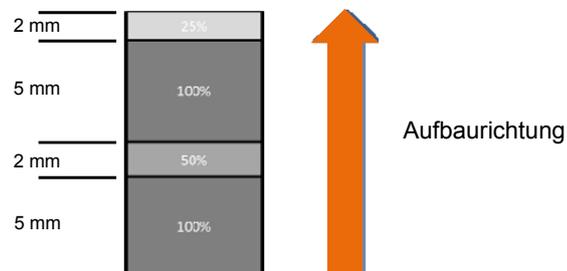


Zertifiziertes Managementsystem  
am Fraunhofer IZFP Saarbrücken



## Testkörper – Variation der Laser-Leistung

Bauhöhe	Laser-Leistung
0 mm – 5 mm	285 W (100%)
5 mm – 7 mm	150 W (50%)
7 mm – 12 mm	285 W (100%)
12 mm – 14 mm	75 W (25%)



© Fraunhofer

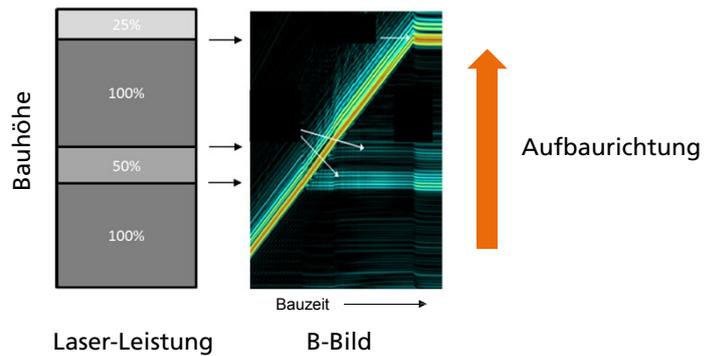


Zertifiziertes Managementsystem  
am Fraunhofer IZFP Saarbrücken



## B-Bild und Ereignis-Korrelation

100 A-Scans/s \* 60 Sekunden \* 90 Minuten = 540.000 A-Scans



© Fraunhofer



Zertifiziertes Managementsystem  
am Fraunhofer IZFP Saarbrücken



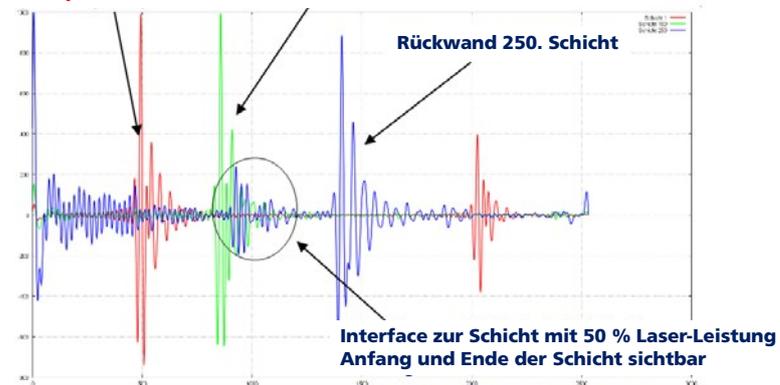
## Variation der Laser-Leistung – Signal-Entwicklung

verschiedene A-scans, Amplitude auf die Rückwand normiert

**Rückwand 1. Schicht = Bauplattform**

**Rückwand 100. Schicht**

**Rückwand 250. Schicht**



© Fraunhofer



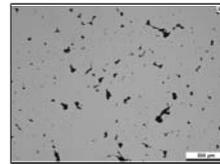
Zertifiziertes Managementsystem  
am Fraunhofer IZFP Saarbrücken



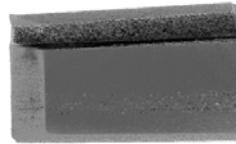
## Validierung



Metallographie



Röntgen-CT

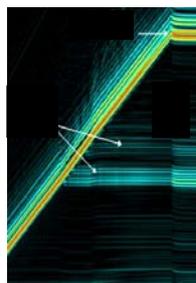


Untersuchte Proben nach Abtrennung von der Plattform

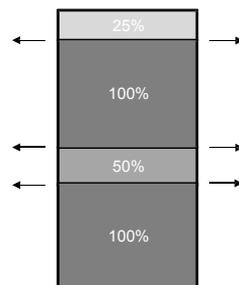
© Fraunhofer



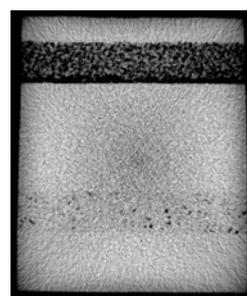
## Validierung II



B-Bild



Laser-Leistung



Röntgen-CT-Bild

starke Porosität (30%)

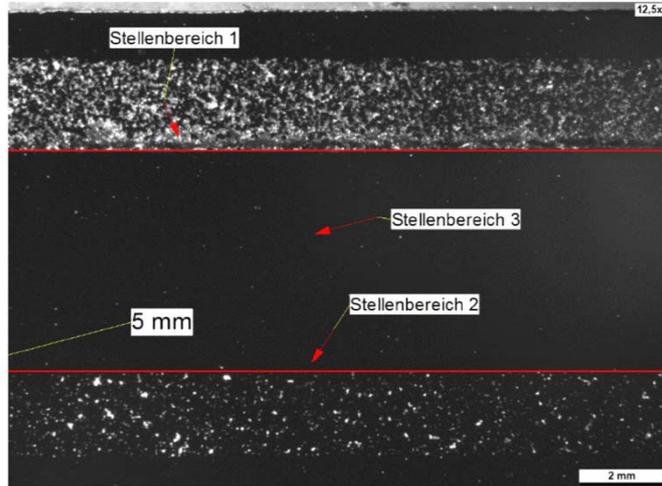
geringe Porosität (3%)

Ultraschall-Online-Detektion von geringer Porosität (< 3%) ist möglich

© Fraunhofer



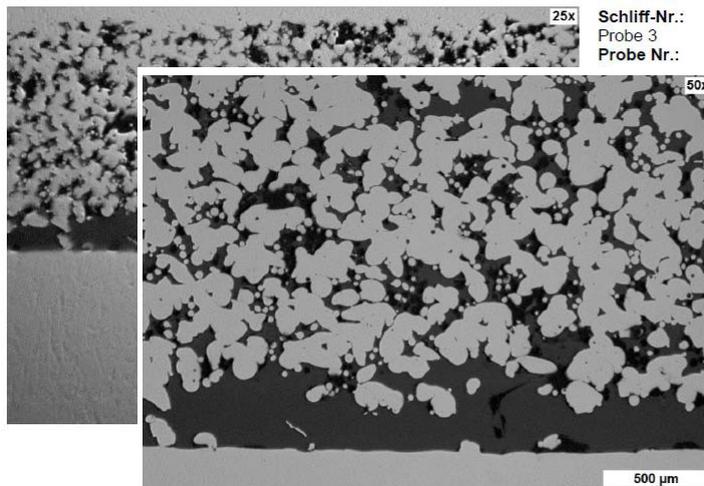
## Metallographie - ungeätzt



© Fraunhofer



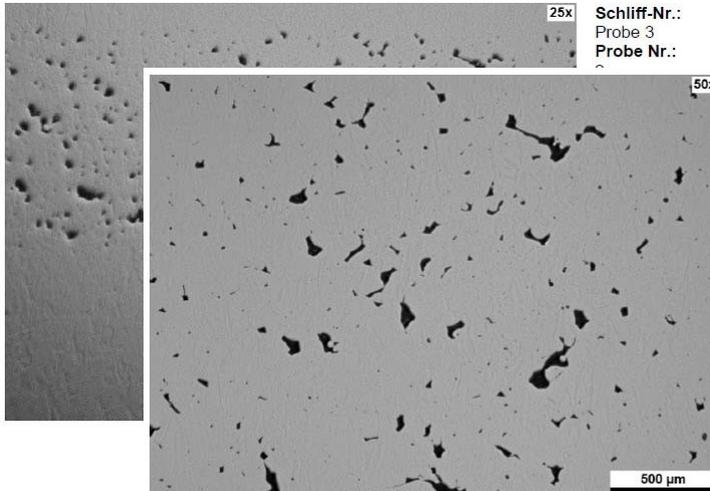
## Metallographie - ungeätzt



© Fraunhofer



## Metallographie - ungeätzt



Schliff-Nr.:  
Probe 3  
Probe Nr.:

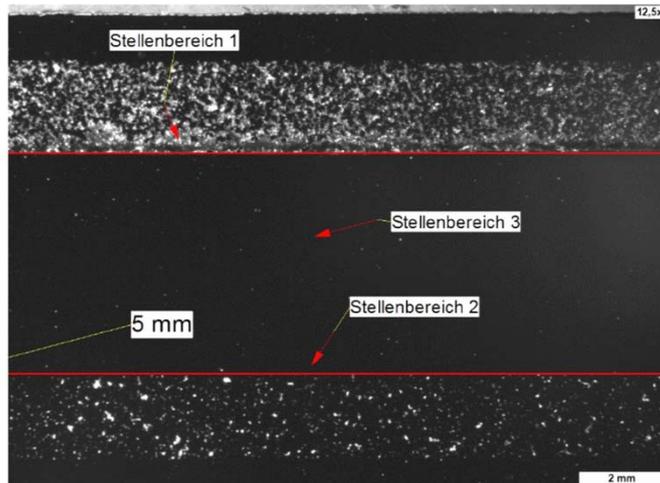
Schliff-Nr.:  
Probe 3  
Probe Nr.:  
3  
Ätzmittel:  
ungeätzt

Bemerkung:  
Stellenbereich 2  
Detail

© Fraunhofer



## Metallographie - ungeätzt



© Fraunhofer



## Bruch - mangelnde Anbindung und Eigenspannungen



© Fraunhofer

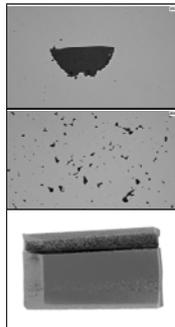


Zertifiziertes Managementsystem  
am Fraunhofer IZFP Saarbrücken



## Validierung III

- Bezug zu metallographischen und Röntgen-CT Untersuchungsergebnissen



Künstliche Fehler: < 3 mm<sup>2</sup>



Porosität (metallo): < 3 %



Porosität (Rö-CT): < 100 µm axiale Auflösung in Aufbaurichtung



© Fraunhofer



Zertifiziertes Managementsystem  
am Fraunhofer IZFP Saarbrücken



## Textur und E-Modul

© Fraunhofer

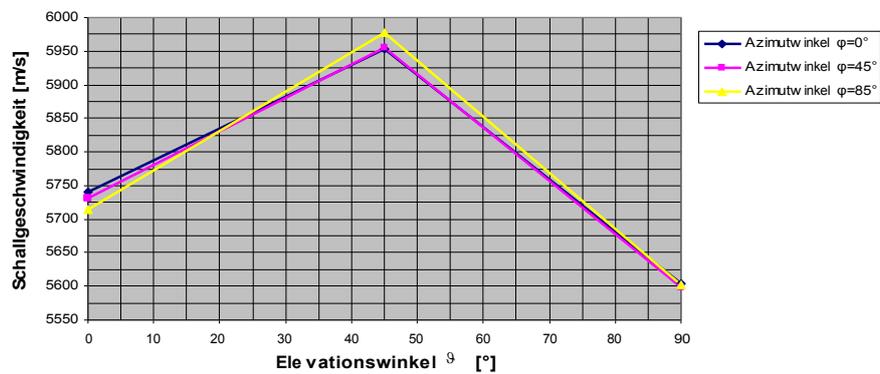


Zertifiziertes Managementsystem  
am Fraunhofer IZFP Saarbrücken



## Schallgeschwindigkeitsmessungen an Oktagon-Proben

Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Elevations- und Azimutwinkel



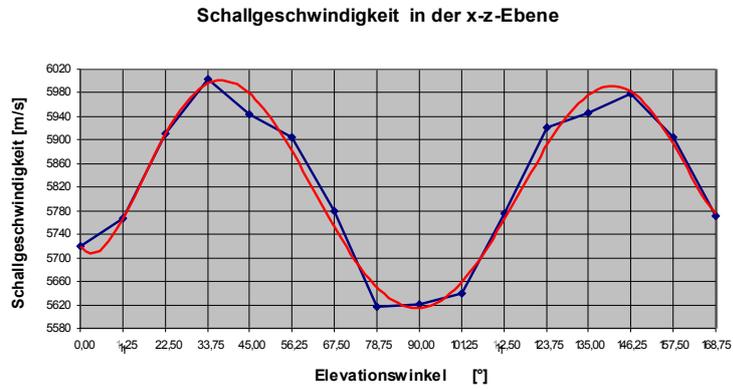
© Fraunhofer



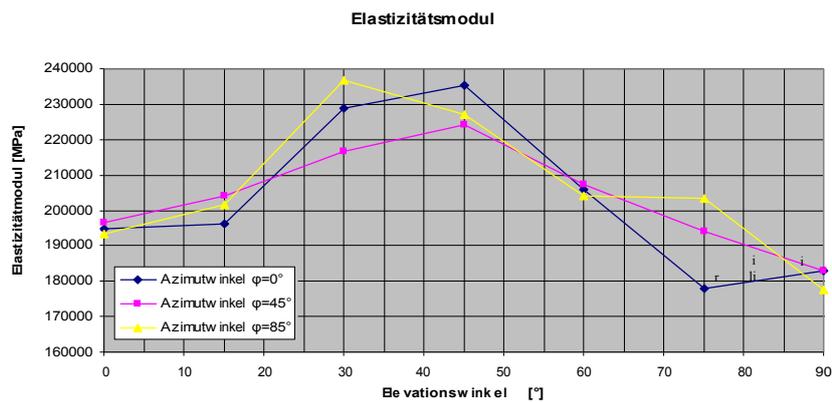
Zertifiziertes Managementsystem  
am Fraunhofer IZFP Saarbrücken



## Schallgeschwindigkeitsmessungen an Oktogon-Proben



## E-Modul-Bestimmung an Zugproben



## Zusammenfassung

- **Online-Monitoring** mit Ultraschall durch die Bauplattform ist machbar
- Beobachtung der **Oberflächendynamik** während des Aufbaus ist möglich
- Quantitative Aussagen hinsichtlich der **Porosität**
- Herstellung von **Testreflektoren** (KSR)

## Ausblick

- Ultraschall-Monitoring als Kontroll- und Referenzmethode
- Charakterisierung der Materialeigenschaften
- Überwachung mittels Kontrollkörpern
- **Bauraumkontrolle!**

© Fraunhofer



Zertifiziertes Managementsystem  
am Fraunhofer IZFP Saarbrücken



## SLM-Testkörper mit Halbkugel-Reflektoren



© Fraunhofer



Zertifiziertes Managementsystem  
am Fraunhofer IZFP Saarbrücken



## Smart SLM-Testblock

### Online-Prüfung

- permante Messung der Schallgeschwindigkeit /Ermittlung der inkrementellen Schallgeschwindigkeit
- Rückschlüsse auf lokale Mikroporosität
- Messung der Ersatzreflektor-Amplituden (Selbstreferenzierung an aktueller Rückwand!)
- Rückschlüsse auf Homogenität des Gefüges

### Offline-Prüfung (mit Linear-Array)

- Sektorscan -> Rückschlüsse auf Anisotropie und Textur
- Erweiterung: zweiachsiger Testblock -> Rückschlüsse auf volle 3D-Textur



© Fraunhofer



Zertifiziertes Managementsystem  
am Fraunhofer IZFP Saarbrücken

