

On- und Offline Materialcharakterisierung bei der Additiven Fertigung

Martin SPIES¹, Simon MÜLLER², Hans RIEDER¹, Joachim BAMBERG²,
Benjamin HENKEL²

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

² MTU Aero Engines AG, Dachauerstraße 665, 80995 München

Kontakt: joachim.bamberg@mtu.de

Kurzfassung

Die additive Fertigung ist eine rasant wachsende Produktionstechnik für die Herstellung komplex geformter 3D-Strukturen. In Verbindung mit bionischem Design lassen sich gewichtsoptimierte Bauteile herstellen, die mit konventioneller Fertigungstechnik nicht oder nur mit erheblichem Aufwand zu realisieren wären. Die additive Fertigung wird gerade deshalb in der Luft- und Raumfahrtindustrie intensiv vorangetrieben.

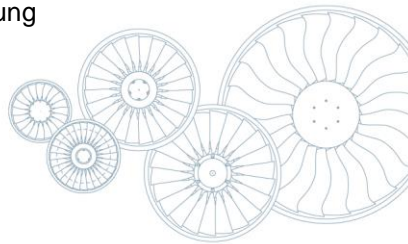
Die MTU Aero Engines setzt hier auf das selektive Laserstrahlschweißen (SLM), bei dem ein Laser lagenweise die Bauteilstruktur in ein Metallpulverbett schweißt. In dem Vortrag wird aufgezeigt, wie das Qualitätssicherungskonzept für die additive Fertigung aussieht und welche zerstörungsfreien Prüf- und Charakterisierungsverfahren dabei eingesetzt werden. Insbesondere wird auf die Materialcharakterisierung mit Ultraschall eingegangen. Es werden Ergebnisse von Online-Messungen in einer EOS-SLM-Anlage aufgezeigt und es wird auf die Möglichkeiten und Vorteile einer nachträglichen, Offline-Ultraschallmessung eingegangen.

In die Zukunft blickend wird am Beispiel eines neuartigen Ultraschall-Testkörpers dargestellt, wie mittels Phased-Array Technik eine noch weitergehende, schnelle Materialcharakterisierung erreicht werden kann.



On- und Offline Materialcharakterisierung bei der Additiven Fertigung

J. Bamberg, B. Henkel, S. Müller, H. Rieder, M. Spies
Symposium Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung
28. November 2017, Berlin

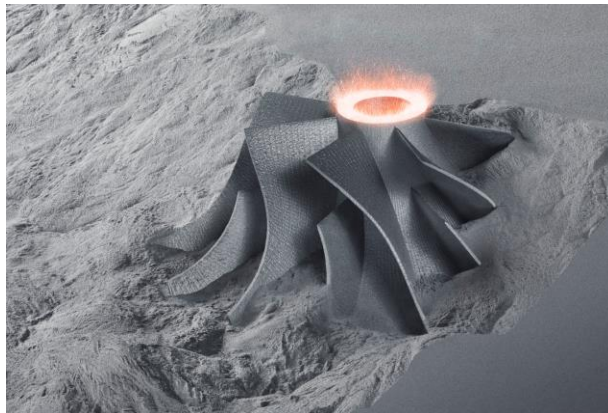


Überblick

- Additive Fertigung mittels Selective Laser Melting
- MTU und Additive Fertigung
- Qualitätssicherungskonzept
- Online Materialcharakterisierung mit Ultraschall
- Offline Materialcharakterisierung mit Ultraschall
- Additiver Ultraschall-Testkörper
- Zusammenfassung und Ausblick

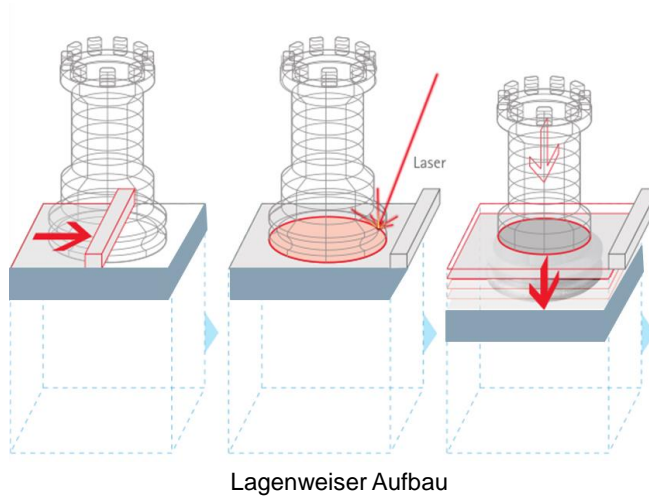
- **Additive Fertigung mittels Selective Laser Melting**
- MTU und Additive Fertigung
- Qualitätssicherungskonzept
- Online Materialcharakterisierung mit Ultraschall
- Offline Materialcharakterisierung mit Ultraschall
- Additiver Ultraschall-Testkörper
- Zusammenfassung und Ausblick

Der Anreiz: Vom Metallpulver direkt zum komplexen Bauteil



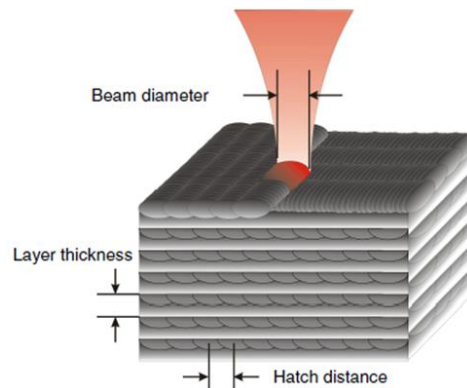
Trumpf, 3druck.com

Prinzip des Selective Laser Meltings



SLM im Detail

- 1050 nm Laser, 400 Watt
- 0.12 mm Fokusbereich
- 0.04 mm Lagendicke
- 0.10 mm Spurbreite
- Scangeschwindigkeit ~ 1 m/s

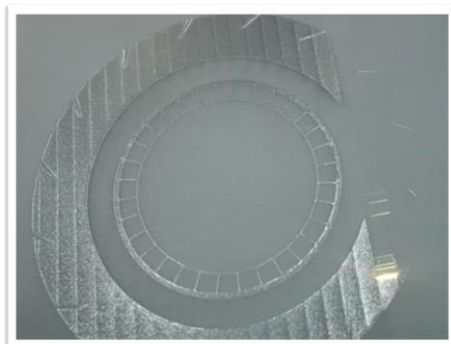


EOS Selective Laser Melting Maschine



- Plattformgröße: 250 x 250 mm²
- Material: IN718

Lagenschweißung



- Zeit für eine Lage zu schweißen: je nach Anzahl der Bauteile und Bauteilgröße ~ 100 s

Die fertigen Bauteile

- Komplexe, hohle 3D-Strukturen
- Bis zu 7000 Lagen



Schleifscheibe



Einspritzdüse (EOS)

- Additive Fertigung mittels Selective Laser Melting
- **MTU und Additive Fertigung**
- Qualitätssicherungskonzept
- Online Materialcharakterisierung mit Ultraschall
- Offline Materialcharakterisierung mit Ultraschall
- Additiver Ultraschall-Testkörper
- Zusammenfassung und Ausblick

Herausforderungen der Luftfahrtindustrie

Treibstoffreduktion

Gewichtsreduktion

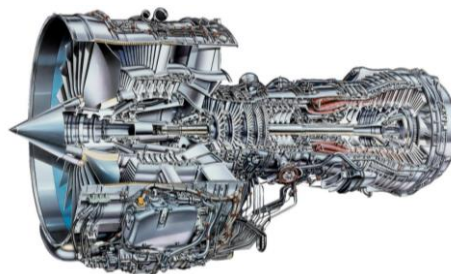
Kostenreduktion



Die Bedeutung für das Flugzeugtriebwerk

Situation: - Triebwerke haben viele, komplex geformte hohle Bauteile

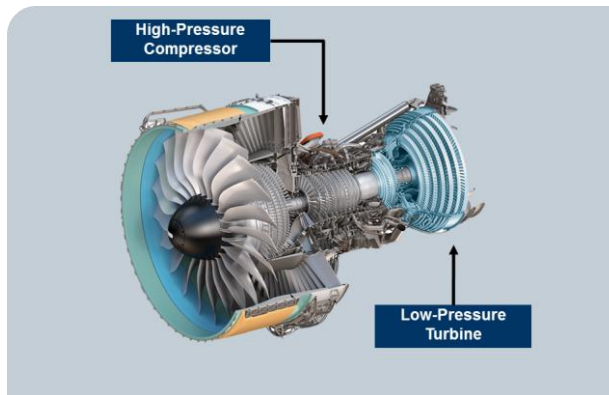
AM-Chance: - Neue Designs
- Leichtbaustrukturen
- Einfachere Herstellung



Herausforderung: - Hohe Qualitätsstandards

Die MTU

- Größter unabhängiger Sub-System Lieferant von Triebwerken



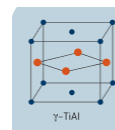
© MTU Aero Engines AG. The information contained herein is proprietary to the MTU Aero Engines group companies.

Innovationen

Innovatives Design „Schnelllaufende Turbine“



Innovatives Material „TiAl-Schaufeln“



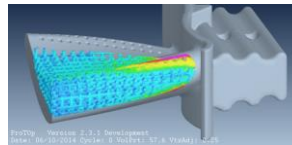
Innovative Produktion „Additive Fertigung“



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

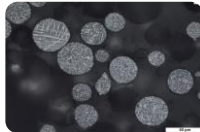
AM Fahrplan

- Phase 1: Produktion von Werkzeugen
(Schleifscheibe)
- Phase 2: Ersatz von konv. Bauteilen
(Boroskopaugen)
- Phase 3: Neue Designs
(Bionische Strukturen)



- Additive Fertigung mittels Selective Laser Melting
- MTU und Additive Fertigung
- **Qualitätssicherungskonzept**
- Online Materialcharakterisierung mit Ultraschall
- Offline Materialcharakterisierung mit Ultraschall
- Additiver Ultraschall-Testkörper
- Zusammenfassung und Ausblick

Die vier Säulen des Qualitätssicherungskonzeptes



QS

Pulver



QS

Produktion



QS

Prozess

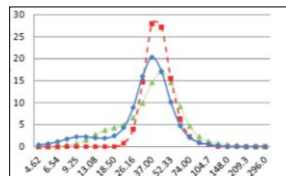
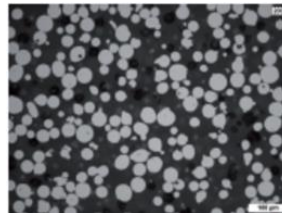


QS

Bauteil

Qualitätsabsicherung Pulver

- Pulver
 - Chemische Zusammensetzung
 - Teilchengröße und -verteilung
 - Morphologie
 - ...
- Prüfzertifikat des Lieferanten
- Requalifizierung des verwendeten Pulvers



Partikelgrößen-Verteilung

Qualitätsabsicherung Produktion

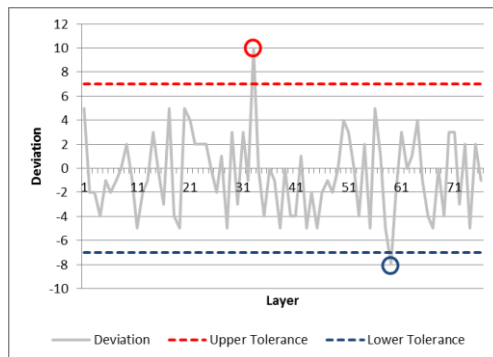
Total Productive Maintenance

- Maschinen-Zulassung
- Maschinen-Kalibrierung
- Maschinenüberwachung
- Personal-Qualifizierung



Qualitätsabsicherung Prozess (I)

- Plattform-Position und -Shift
- Sauerstoffkonzentration
- Argon-Druck
- Plattform-Temperatur
- Kollisions-Check

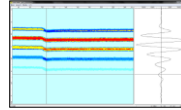


Layer thickness variations

Qualitätsabsicherung Prozess (II)

Ultraschall Monitoring

- Lokale elastische Eigenschaften
- Messung an Begleitproben



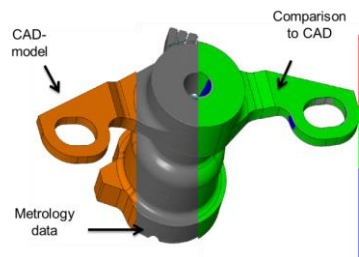
Optische Tomografie

- Laserstreckenenergie
- Wärmeableitung



Qualitätsabsicherung Bauteil

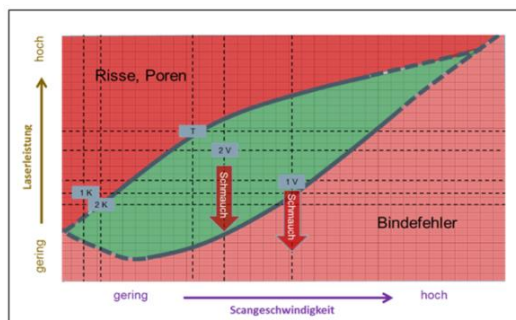
- Maßprüfung
 - Weißlicht-Scan
 - Abweichungen vom CAD-Modell
- ZfP: X-CT, FPI, VT
 - Porosität
 - Risse
- Material-Prüfung
 - Zugversuch
 - LCF / HCF
 - Begleitproben/Metallografie



- Additive Fertigung mittels Selective Laser Melting
- MTU und Additive Fertigung
- Qualitätssicherungskonzept
- **Online Materialcharakterisierung mit Ultraschall**
- Offline Materialcharakterisierung mit Ultraschall
- Additiver Ultraschall-Testkörper
- Zusammenfassung und Ausblick

Ursachen von Fehlerentstehung und Materialveränderungen

- Ungeeignete Prozessparameter in Verbindung mit Bauraumpositionen und Bauteilgeometrien:
 - Poren, Risse und Bindefehler
 - schlechtere Materialkennwerte (E-Modul, Festigkeit, Mikroporosität)

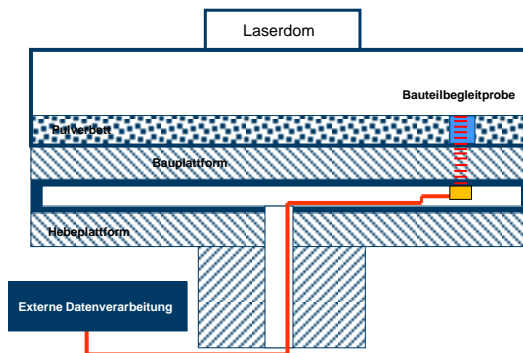


Warum Online-Messungen?

- Interface-Anbindung
 - Dynamik des Schichtaufbaus
 - Lokale Materialeigenschaften (E-Modul)
 - Rissinitierung (Eigenspannungen)
 - Lokale Mikroporosität
- } effizient nur online möglich

Messprinzip

- Ultraschall-Laufzeitmessung durch die Bauplattform

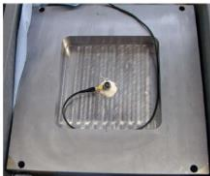


Integration in eine EOS-Anlage

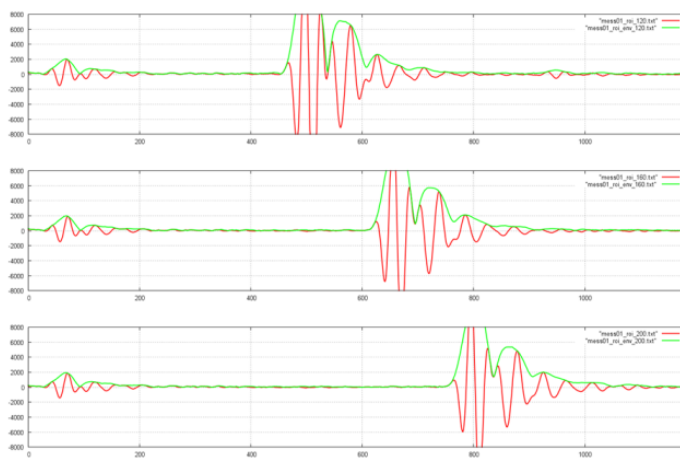
- Hermetisch dichte Kabelzuführung (Schutzgas)



- 10 MHz Prüfkopf, ¼ Inch (in Ausfräsung)



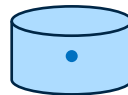
Laufzeitveränderung während des Baujobs



Testkörper 1

- **Zylinder mit innenliegendem Fehler:**

- 20 mm Durchmesser
- 10 mm Höhe
- Pore (sphärisch, 2 mm Ø)



- **Baujob:**

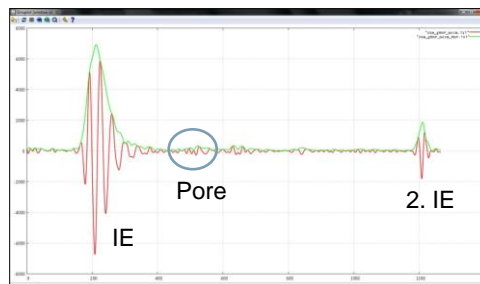
- 40 µm Schichtdicke
- 250 Schichten
- 90 Minuten Bauzeit



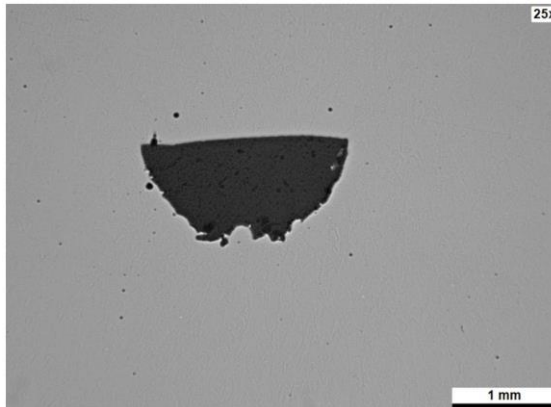
A*-Scan

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

- Rauschreduktion
- nur statische Objekte werden sichtbar (Interface-Echo, Defekte)
- Rückwandechos mitteln sich weg



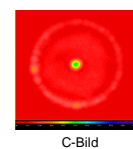
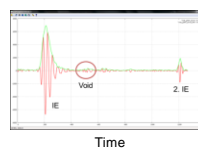
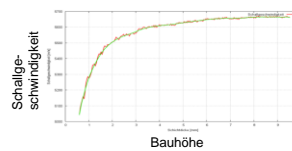
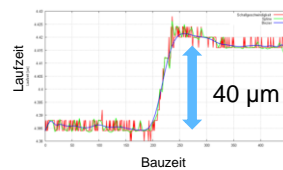
Halbkugel als Kreisscheibenreflektor



Schliffbild

Weitere Ergebnisse

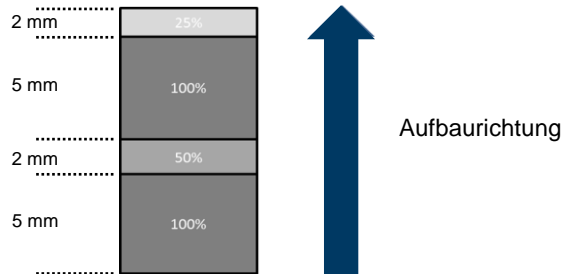
- Auflösung der einzelnen Schweißlagen, Aufbau wird kontinuierlich aufgezeichnet
- Ermittlung der lokalen Schallgeschwindigkeit
- Echtzeit-Detektion von Fehlstellen



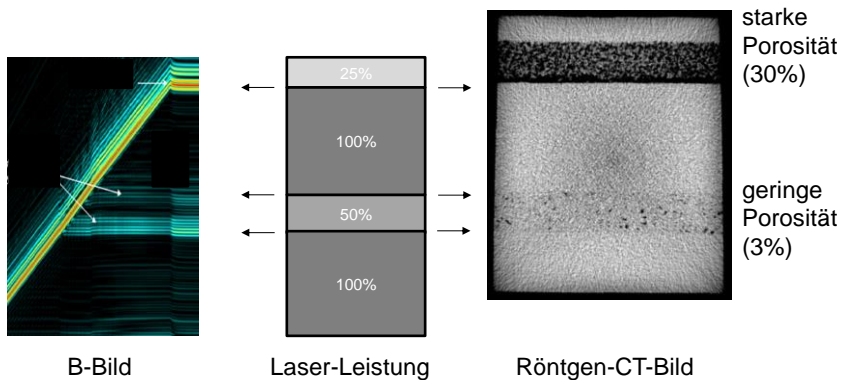
Testkörper 2

Variation der Laserleistung während des Baujobs (300 W, 150 W, 75 W)

→ Erzeugung unterschiedlicher Porositäten

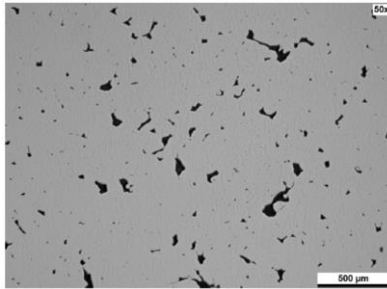


Messung und Validierung

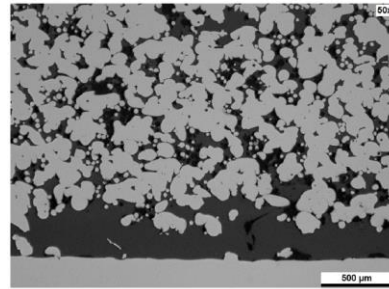


Ultraschall-Online-Nachweis auch geringer Porosität (3%) ist möglich

Unterschiedlich stark induzierte Porosität



3 %



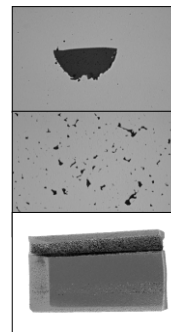
30 %

1. Zwischenfazit

Künstliche Fehler: 3 mm²

Porosität (metallo): 3 %

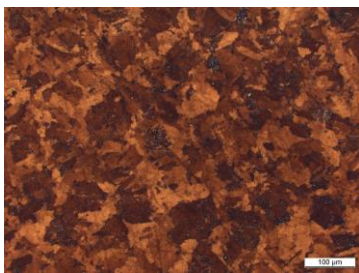
Porosität (X-CT): 100 µm axiale
Auflösung in
Aufbauichtung



Mikroporosität, lokale Rißentstehung durch Eigenspannungen und lokaler E-Modul können online gemessen und zur raschen Materialcharakterisierung genutzt werden.

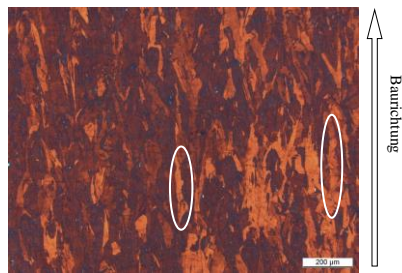
- Additive Fertigung mittels Selective Laser Melting
- MTU und Additive Fertigung
- Qualitätssicherungskonzept
- Online Materialcharakterisierung mit Ultraschall
- **Offline Materialcharakterisierung mit Ultraschall**
- Additiver Ultraschall-Testkörper
- Zusammenfassung und Ausblick

Gefügestruktur IN718 additiv hergestellt



Flachschiiff

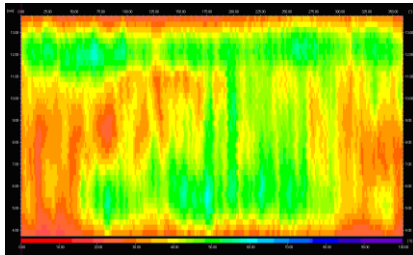
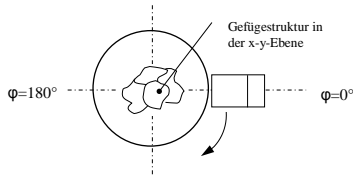
- Korngröße von 50µm bis 100µm
- Hinsichtlich Kornorientierung und Korngröße sehr homogen und kaum richtungsabhängig
- Keine Vorzugsrichtung



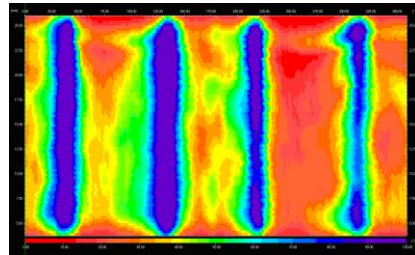
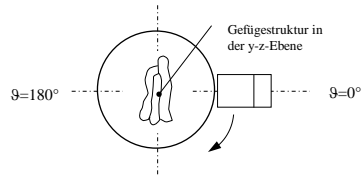
Längsschiiff

- Korngröße in Baurichtung bis 400µm
- Einzelnes Korn wird über das ständige Aufschmelzen sukzessive in Baurichtung nach oben verlängert
- Ausgeprägte Anisotropie

Ultraschall-Intensitätsanalyse

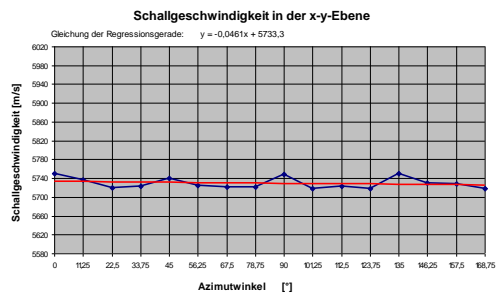
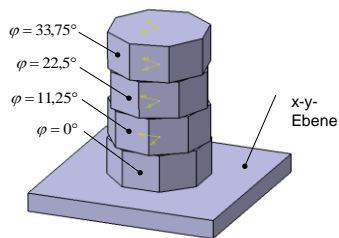


Ergebnisse der stehend gebaute Probe



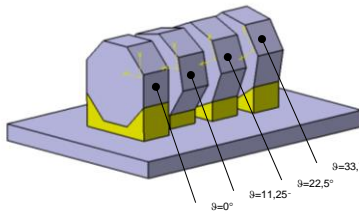
Ergebnisse der liegend gebaute Probe

Oktogon-Testkörper – Variation des Azimutwinkels

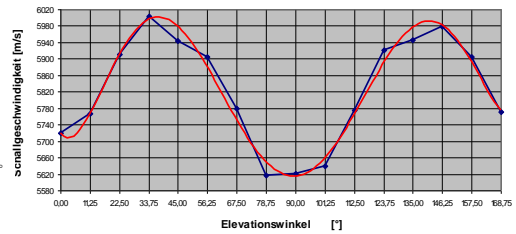


- Gegeneinander verdrehte Oktagone lassen Messungen in Abständen von $11,25^\circ$ zu.
- Maximale Differenz von nur 44m/s entspricht weniger als 1% des Mittelwerts.
- Abhängigkeit der Ultraschallgeschwindigkeit im Bauteil vom Azimutwinkel unabhängig.

Oktagon-Testkörper – Variation des Elevationswinkels

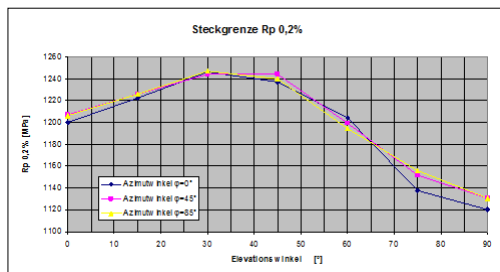
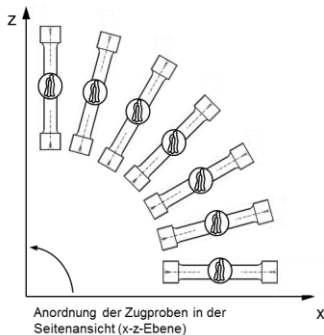


Schallgeschwindigkeit in der x-z-Ebene



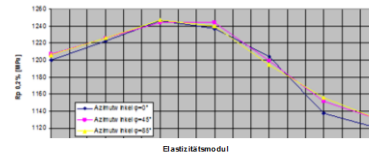
- Minimum bei $\vartheta=90^\circ$ (Einschallung entlang der Vorzugsrichtung des Gefüges)
- Maximum bei $\vartheta=40^\circ$

Aufbaurichtung von Zugproben und Streckgrenzen

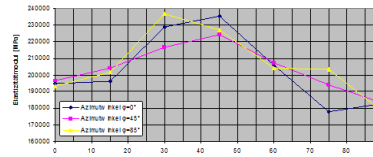


Vergleich Streckgrenze, E-Modul und Schallgeschwindigkeit

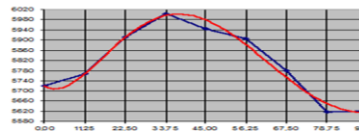
Streckgrenze



E-Modul



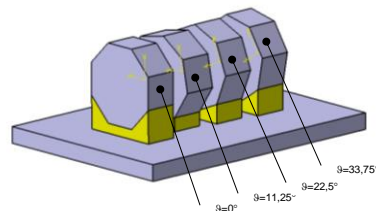
Schallgeschwindigkeit



- Unter dem Elevationswinkel der höchsten Ultraschallgeschwindigkeit liegt die höchste Streckgrenze und der höchste Elastizitätsmodul des Bauteils vor.

2. Zwischenfazit

Oktagon-Testkörper helfen bei der Charakterisierung des Gefüges und ermöglichen eine Korrelation zu mechanischen Kennwerten.



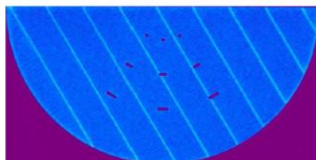
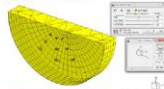
Der Aufbau des Gefüges und Materialkennwerte, wie z.B. die Streckgrenze, können offline mit Ultraschall schnell und im gesamten Bauraum ermittelt werden.

- Additive Fertigung mittels Selective Laser Melting
- MTU und Additive Fertigung
- Qualitätssicherungskonzept
- Online Materialcharakterisierung mit Ultraschall
- Offline Materialcharakterisierung mit Ultraschall
- **Additiver Ultraschall-Testkörper**
- Zusammenfassung und Ausblick

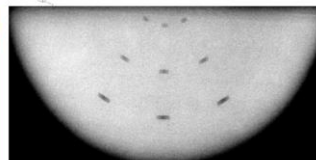
Additiv gefertigter Halbzylinder aus IN718 mit Testfehlern

Halbzylinder mit innenliegenden "Fehlstellen"

- additiv gefertigt
- Radius = 50 mm, Tiefe = 30 mm
- Kreisscheibenreflektoren auf Kreisbahnen mit $D = 2 \text{ mm}, 3 \text{ mm}, 4 \text{ mm}$, Höhe = 1 mm



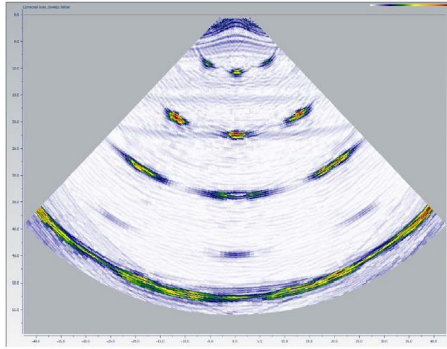
OT-Bild



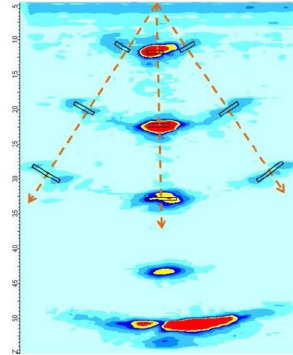
Röntgenbild

Phased Array Messungen bei Salzgitter Mannesmann, T. Orth et al.; DGZfP-Jahrestagung Koblenz 2017

Phased-Array Sektor-Scan und SAFT-Rekonstruktion

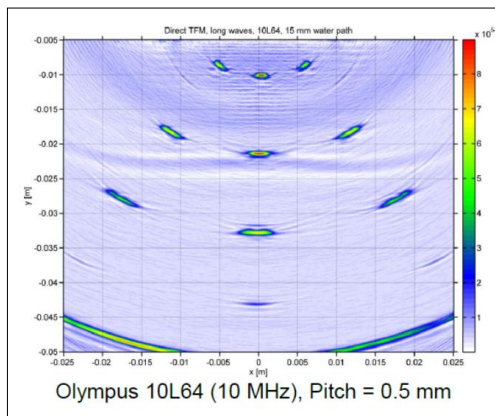


Sektor-Scan, Olympus 5L64, 64 Elts, 5 MHz,
WaVo 15 mm, DDF 10 - 40 mm, Fokus 20 mm



SAFT-Rekonstruktion
Olympus Prüfkopf C543, d=6mm, 5 MHz

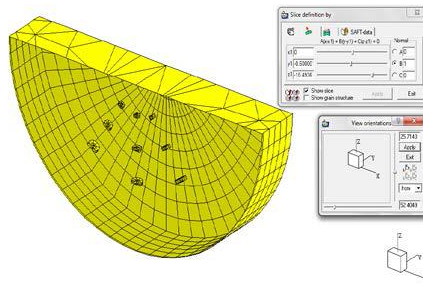
TFM-Rekonstruktion mit 64 Elementen und 10 MHz



- Schnelle und genaue Schallgeschwindigkeitsbestimmung in allen Raumrichtungen

3. Zwischenfazit

- AM-US-Testkörper



Additiv gefertigte Ultraschall-Testkörper erlauben die schnelle Materialcharakterisierung in allen Baujobaufbaurichtungen und –tiefen (vgl. Schöpfprobe beim Guss).

- Additive Fertigung mittels Selective Laser Melting
- MTU und Additive Fertigung
- Qualitätssicherungskonzept
- Online Materialcharakterisierung mit Ultraschall
- Offline Materialcharakterisierung mit Ultraschall
- Additiver Ultraschall-Testkörper
- **Zusammenfassung und Ausblick**

Zusammenfassung

Das erste AM-Bauteil ist nun im Triebwerk:

Boroskopage im PW1100G-JM für Airbus A320 NEO



- Komplette AM-Prozesskette ist qualifiziert.
- On- und Offline-Materialcharakterisierungen mit Ultraschall haben zu einem schnelleren und besseren Verständnis der Additiven Fertigung und zur frühzeitigen Qualitätsabsicherung beigetragen.

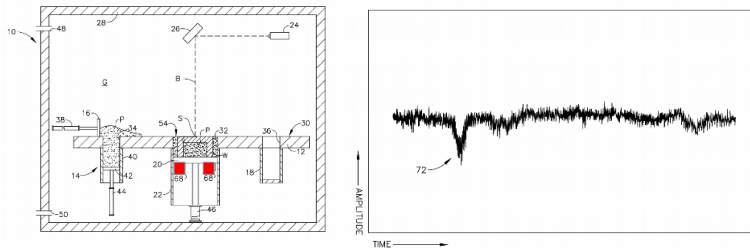
Ausblick: Neue Designs und bionische Strukturen

- gewichtsoptimiert
- filigrane Bauweisen
- komplexer 3D-Aufbau (Knochenstruktur)
- multifunktional (tragend und dämpfend)



Ausblick: Online-Ultraschallcharakterisierung von AM-Bauteilen

- Identischer US-Aufbau, aber Nutzung der Schallemissionsanalyse



- Erfassung der Schweißgeräusche (*GE Pat. Anm. CA2948247, Mai 2017*)
- Durch gleichzeitige Erfassung der Laserkoordinaten → 3D-Charakterisierung des Bauteils

The story goes on!



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

