

# Online-Prozessüberwachung mittels Ultraschall bei der generativen Fertigung

Joachim BAMBERG<sup>1</sup>, Alexander DILLHÖFER<sup>2</sup>, Thomas HEß<sup>1</sup>, Hans RIEDER<sup>2</sup>,  
Martin SPIES<sup>2</sup>,

<sup>1</sup> MTU Aero Engines GmbH

<sup>2</sup> Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM, Kaiserslautern

## Kurzfassung

Mit der Generativen Fertigung (auch Additive Verfahren genannt) können Bauteile durch schichtweises, lokales Erschmelzen eines pulverförmigen Ausgangswerkstoffes hergestellt werden. Dieses Fertigungsverfahren besitzt im Vergleich zu heutigen, konventionellen Herstellverfahren eine wesentlich höhere Designfreiheit und ein großes Potenzial hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit; damit ist es auch für die Herstellung geometrisch komplizierter Triebwerksbauteile sehr interessant.

Durch lokales Erschmelzen mit einem Laserstrahl konnten bereits Triebwerksbauteile aus der warmfesten Nickellegierung Inconel 718 hergestellt werden. Zur Absicherung der Qualität werden dabei Ausgangspulver und Fertigungsparameter überwacht sowie das Bauteil zerstörungsfrei nachuntersucht.

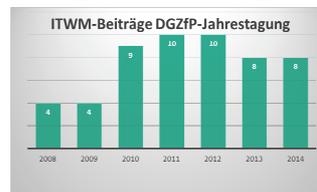
Um die komplexe Dynamik dieses Fertigungsprozesses noch genauer beschreiben und verstehen zu können, wurden erstmals Online-Ultraschallmessungen durchgeführt. In diesem Beitrag berichten wir über die Integration der Messtechnik in die Fertigungsanlage und zeigen anhand von generalisierten B-Bildern Ergebnisse, die den Aufbau von Testkörpern aus einzelnen, 40 µm dünnen Schichten illustrieren. Durch die Analyse der Signale kann auf die Anbindung der einzelnen Lagen sowie auf die zeitliche Entstehung von Materialfehlern geschlossen werden.



## ZfP am Fraunhofer ITWM: Ultraschall, Optik, CT

### AG Ultraschall Imaging: ...Prozesskette für komplexe Materialien und Bauteile...

- Sensorsimulation und -optimierung
- Simulation der Ultraschallanregung, -ausbreitung und Fehlerwechselwirkung
- Datenakquisition, Signalverarbeitung, Aus- und Bewertung
- Maßgeschneiderte Inspektions- und Monitoring-Systeme
- Bildgebende Verfahren, (SAFT, TOFD, Phased Array, seit 2008 ‚3D-US‘)
- Probability of Detection (POD)
- E-Learning
- seit Oktober 2007: über 50 Beiträge zu den DGZfP-JT



1

Competence in NDT&E



## Unsere Themen in diesem Jahr

- |   |                 |
|---|-----------------|
| ■ <b>Online-Prozessüberwachung</b>                  | <b>Mo.3.A.1</b> |
| ■ Simulation und POD für Oberflächenfehler          | Mo.3.B.4        |
| ■ Schweißnahtprüfung (mit der MPA Stuttgart)        | Di.2.B.1        |
| ■ Rohrprüfung (mit Salzgitter-Mannesmann Forschung) | Mi.2.A.4        |
| ■ ZfP für Leichtbauwerkstoffe                       | Mi.3.C.1        |
| ■ Spannungsmessung an Triebwerkswerkstoffen         | P25             |
| ■ Porositätsmessung an gegossenen Bronzen           | P28             |
| ■ Schnelle Simulation für komplexe Materialien      | P48             |

Kontaktieren Sie uns unter ‚ZfP@itwm.fraunhofer.de‘



2

Competence in NDT&E



## Online-Prozessüberwachung mittels Ultraschall bei der generativen Fertigung

DGZfP-Jahrestagung 2014  
Potsdam, 26.-28. Mai 2014

J. Bamberg<sup>1</sup>, Alexander Dillhöfer<sup>2</sup>, T. Heß<sup>1</sup>, H. Rieder<sup>2</sup>, Martin Spies<sup>2</sup>

<sup>1</sup> MTU Aero Engines, München

<sup>2</sup> Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM, Kaiserslautern



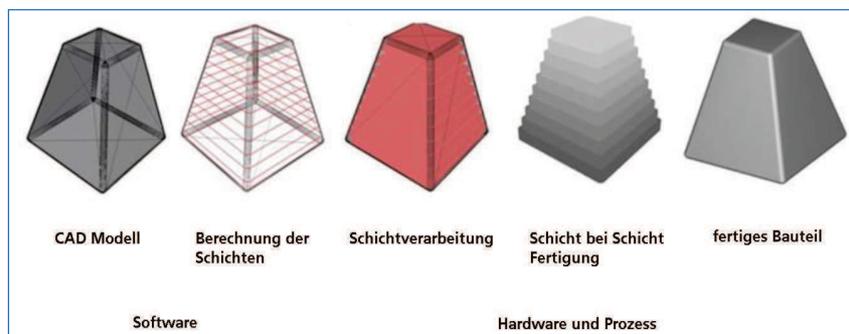
3

Competence in NDT&E



## Ultraschall Monitoring – Additive Manufacturing

- Rapid Prototyping: ~ 25 Jahre Forschung und Entwicklung
- Additive Manufacturing (AM) für die direkte Herstellung von Metallteilen  
~ 12-jährige Geschichte



Quelle: MERLIN\_TWI\_EASN(f)-TWI.pdf

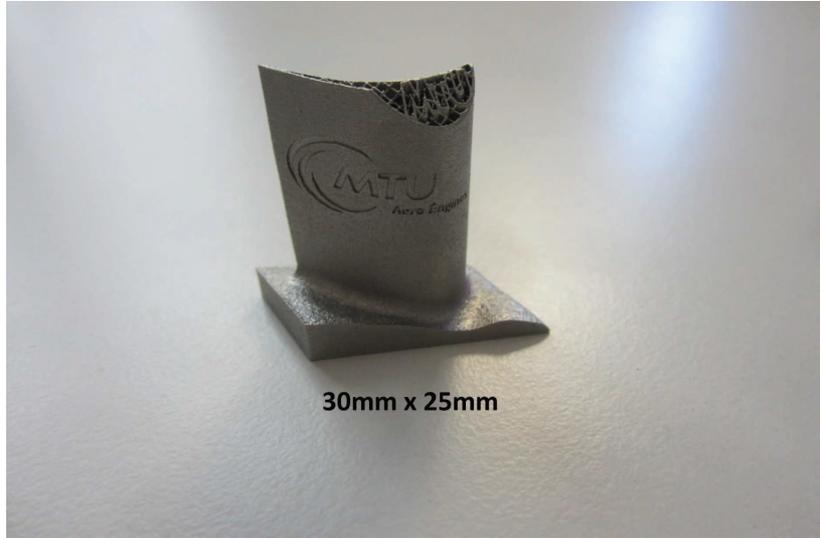


4

Competence in NDT&E



## Ultraschall Monitoring – Additive Manufacturing



30mm x 25mm



5

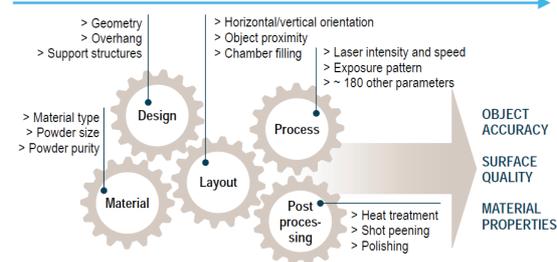
Competence in NDT&E



## Generative Fertigung – Wo steckt die ZfP?

### Complexity of AM production process

#### PRODUCTION PARAMETERS AND CHALLENGES (example)



Quelle: Additive Manufacturing  
A game changer for the manufacturing industry?  
RolandBerger, Strategy Consultants  
Munich, November 2013



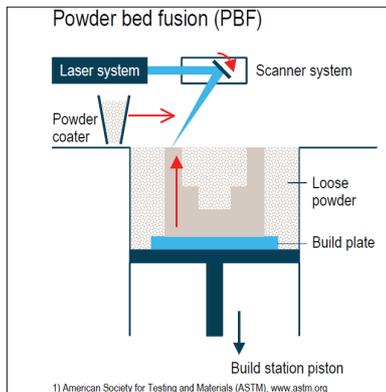
6

Competence in NDT&E



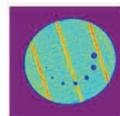
## Additive Manufacturing – Generative Fertigung – „3D-Drucken“

- Powder bed fusion (PBF) ist die am häufigsten verwendete Technik zum 3D-Drucken von Metallgegenständen
- Selective Laser Melting (SLM)

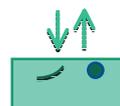


## Qualitätssicherung

- Schichtaufbau mittels Einstellung und Regelung der Prozessparameter
- Expertise des Geräteherstellers
- Zusätzliche Maßnahmen zur Qualitätssicherung
  - Monitoring der Bauteiloberfläche
  - Beobachtung des Schweißprozesses im Prozess mittels Thermographie und optischen Verfahren
- Einsatz Laser-Ultraschall
  - Zerstörungsfreie Prüfung → Detektion von Rissen und Volumenfehlern



Quelle: MTU Aero Engines AG



## Ultraschall-Monitoring

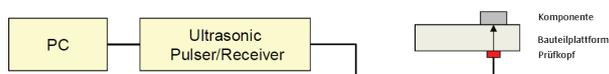
- Monitoring im Prozess mittels Ultraschall
  - Prüfung von der Unterseite des Bauteilträgers
    - Zielsetzung: Beobachtung
      - Dynamik des Schichtaufbaus
      - lokale Materialeigenschaften
      - Eigenspannungen
      - Porosität

nur „on-line“  
im Prozess  
verfügbar!

## Ultraschall-Monitoring

- Problem: Restriktionen in Bezug auf den Einbau zusätzlicher Komponenten im Bauraum, verschärfte Umgebungsbedingungen

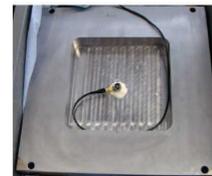
- Schematischer Aufbau



- Versiegelter Einbau der HF- und Steuerkabel unter der Bauplatzform



- Prüfkopf ist an der Unterseite der Bauplatzform angebracht
  - 10 MHz Prüfkopf, ¼ Inch, unfokussiert
  - Ankopplung mittels Fett
  - Prüfkopf ist angeklebt



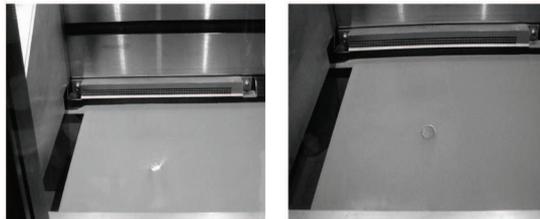
## Aufbau eines Bauteils mittels Selective Laser Melting (SLM)



Einrichtbetrieb:

u.a. mit Aufwärmphase des Bauraums bis 80° unter Schutzgas-Atmosphäre

Laser Schweißprozess



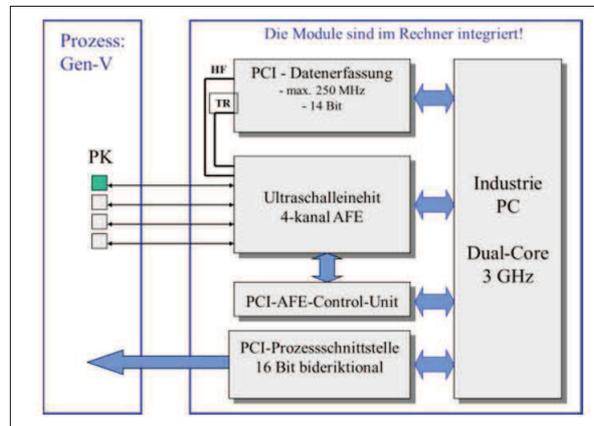
Aufbau eines Zylinders



## Monitoring Prüfsystem

- PC basiertes Prüfsystem für die Integration in Fertigungsanlagen
  - 4 Kanal Ultraschall Sende- und Empfangssystem
  - Bandbreite 400 KHz bis 30 MHz
  - Datenerfassung 250 MS/s 14 Bit
  - Triggerung durch Prozesssignale
  - Monitoring: Zeit- und Ereignis gesteuert:
    - bis zu 1000 A-Scan/s
    - integrierte DSP-Funktionalität
  - Visualisierung „on- und off-line“

## Monitoring Prüfsystem

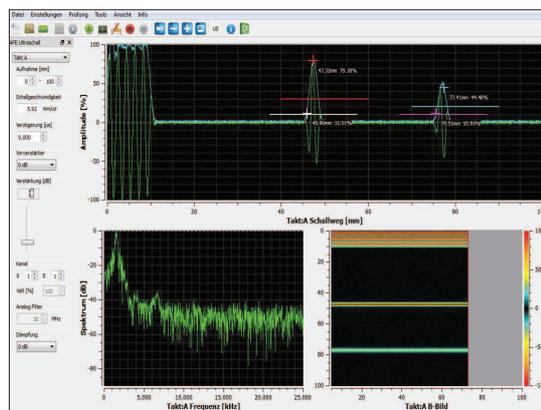


## Monitoring Prüfsystem – Integration und Test



Fertigungslabor: MTU Aero Engines AG  
Integration und Test des Systems

Bauraum ist geöffnet:  
Einrichtbetrieb



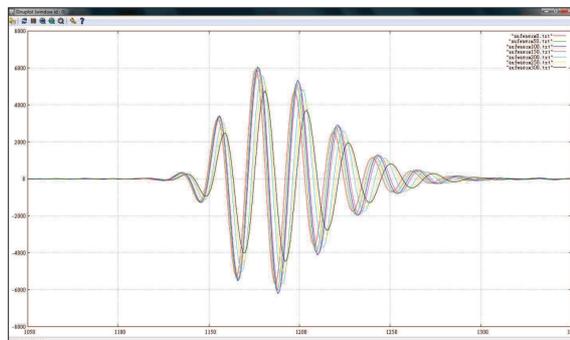
## Ultraschall Monitoring – Was wird gemessen?

- Messsystem liefert Ultraschallsignale mit einer Zeitauflösung von bis zu 4ns
- Pro Ereignis, z.B. Prozesssignal „Start Schweißvorgang“ einer Schicht
  - on-line Aufzeichnung von „N“ Ultraschallsignalen in einem Zeitfenster im Prozess
  - On-line Visualisierung der HF-Signale
  - Signalverarbeitung
  - Speicherung der Signale
- Auswertung in der aktuellen Version erfolgt „off-line“
- Anforderungen an die Prüfung
  - Prüfzeiten bis zu 4 Std.
  - bis zu 1000 Datenerfassungen (HF-Signale) pro Sekunde
  - Datenmenge (...Gbyte....)

## Ultraschall Monitoring – Messung im Prozess

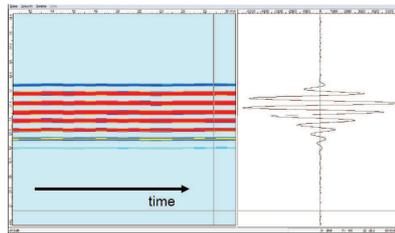
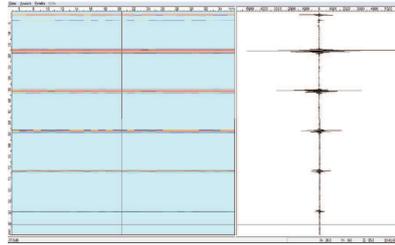
- Messung im Prozess
  - Aufwärmphase → stabiles Signal bei 80°
  - Schweißphase
  - Off-line Auswertung

Beispiel: Signale während des Aufwärmens des Bauraums (Argon Atmosphäre, 80°) (Ereignisse 0, 50, 100, 150, 200, 250, 299)



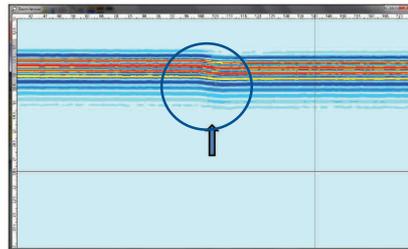
## Ultraschall Monitoring – Aufwärmphase

- Puls-Echo-Sequenz (nur Plattform) vor Beginn des SLM-Prozesses
- Aufnahme von mehreren Rückwandechos
- Rückwandecho und Zeitabhängigkeit vor Beginn des SLM-Prozesses

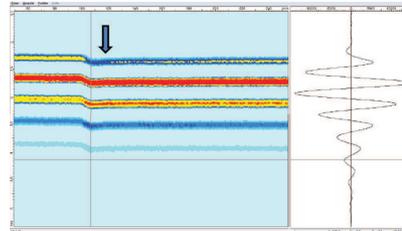


## Ultraschall Monitoring

Zeitabhängigkeit des Rückwandechos nach dem Start des SLM-Prozesses,  
Nachweis des 40 µm Schichtaufbaus



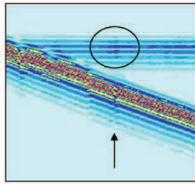
Detailliertes Rückwandecho einer Schicht,  
Zeitabhängigkeit nach dem Start des SLM-Prozesses



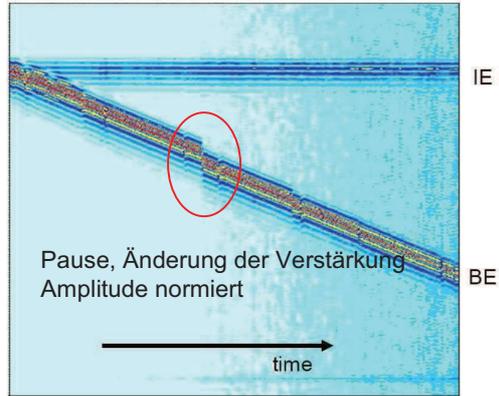
## Ultraschall Monitoring

- Aufbauprozess wird beobachtbar
- "Störungen" wegen Anpassung der Verstärkung

- kleine Änderungen bei einer Schichtdicke von 1.5 mm



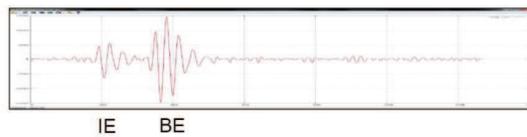
B\*-scan: B-scan mit der Zeit als "Linearachse"



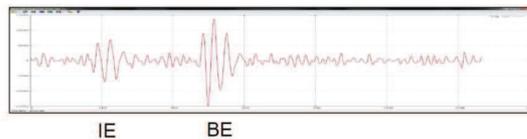
## Ultraschall Monitoring – Beispiel für Signale während des Schichtaufbaus

Aufbauhöhe

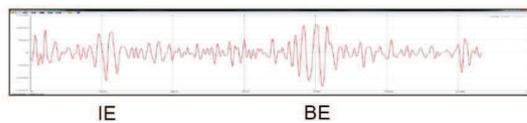
1.6 mm



4.0 mm

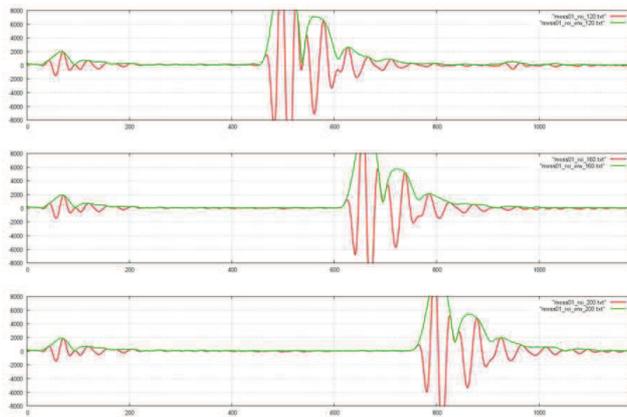


6.0 mm



Verlust der Kopplung -->

## Ultraschall Monitoring – HF-Signale zum Schichtaufbau

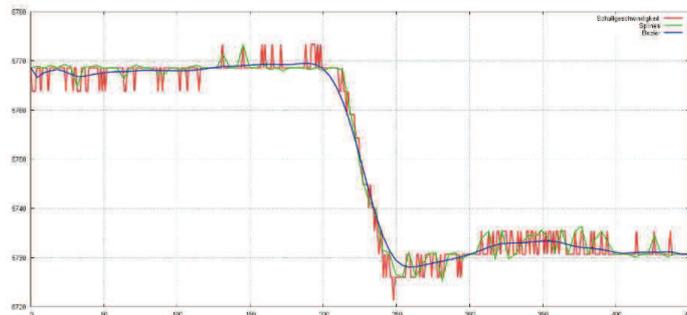


## Ultraschall Monitoring – Messung Verlauf der Schallgeschwindigkeit

### Verlauf der Schallgeschwindigkeit beim Schweißprozess (Event 60)

Annahme: Bauteildicke für alle Aufnahmen gleich → variierende Schallgeschwindigkeit

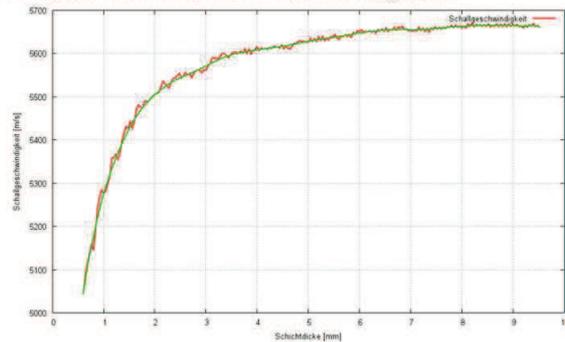
Sprünge der roten Kurve = Auflösung der Abtastung



## Ultraschall Monitoring – Beispiel zur Messung der Schallgeschwindigkeit

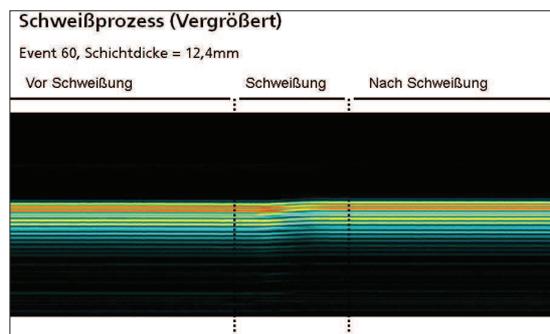
### Schallgeschwindigkeit der einzelnen Schichten

- Mittelung der Schallgeschwindigkeit der ersten 40 Unterereignisse
- Darstellung der Schichten 15 (Dicke = 0,6mm) bis 240 (Dicke = 9,6mm)  
→ Einfluss der Wärme bei dünner Bauteildicke größer?



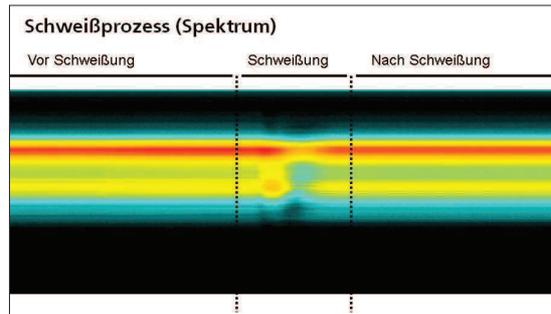
## Ultraschall Monitoring – Frequenzverhalten

- Messung während eines Baujobs
- Aufbau von 10mm – 20mm, Testfehler: 4mm Halbkugel, Schichtdicke = 10mm + EventNr-K \* 40µm



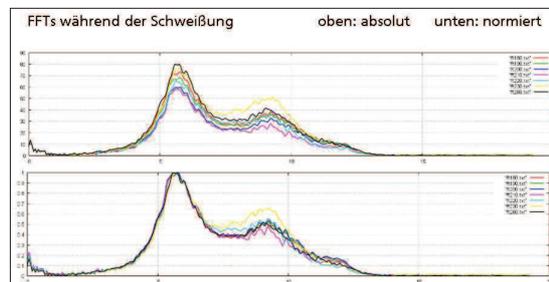
## Ultraschall Monitoring – Frequenzverhalten

- Messung während eines Baujobs
- Aufbau von 10mm – 20mm, Testfehler: 4mm Halbkugel, Schichtdicke = 10mm + EventNr-K \* 40µm

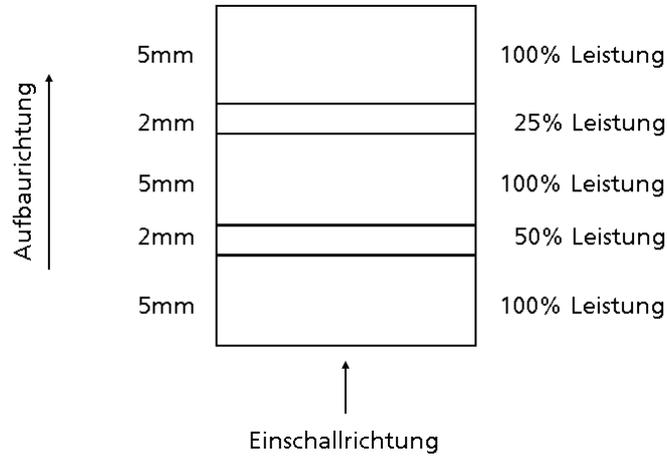


## Ultraschall Monitoring – Frequenzverhalten

- Messung während eines Baujobs
- Aufbau von 10mm – 20mm, Testfehler: 4mm Halbkugel, Schichtdicke = 10mm + EventNr-K \* 40µm

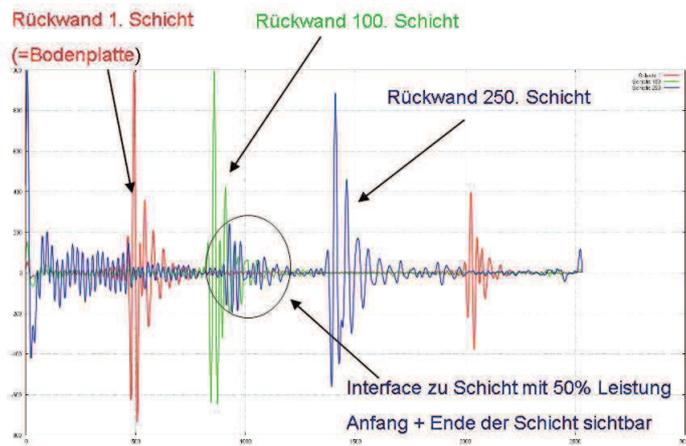


## Ultraschall Monitoring – Fertigung mit Variation der Schweißleistung



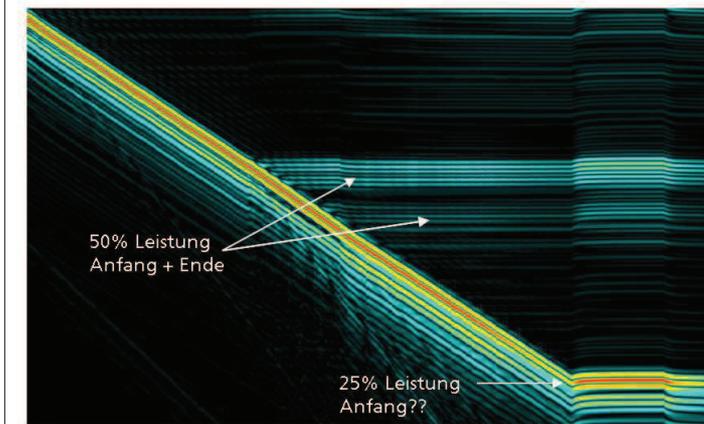
## Ultraschall Monitoring – Fertigung mit Variation der Schweißleistung

### Diverse A-Scans, Amplitude normiert auf Rückwandecho



### Schichtaufbauprozess

Amplitude normiert auf Rückwandecho



### Zusammenfassung

- Online-Überwachung mittels Ultraschall durch die Bauplattform ist machbar
- Beobachtung der Oberflächendynamik (Rückwand) des Schichtaufbaus ist möglich
- Wir sehen in den Signalen Indikatoren für die qualitative Bewertung der Eigenspannung
- Wir sehen die Möglichkeit, eine qualitative Aussage zur Porosität zu treffen

### Ausblick

Weitere Forschungsarbeiten sind erforderlich:

- Stabilisierung der Prüfrandbedingungen, z.B. Ankopplung
- Untersuchung von verschiedenen Fehlertypen und deren Anordnung im Bauteil
- On-line-Monitoring von sensitiven Bauteilen in Bezug auf die Bestimmung von Spannungszuständen
- Bestimmung von Porositäten → Matrixarray (siehe auch P28, Poster mit Kurzpräsentation)

