

Sicherheit in Technik und Chemie

08.11.2018

VERFAHRENSENTWICKLUNG FÜR DIE PROZESSÜBERWACHUNG IN DER ADDITIVEN FERTIGUNG - THERMOGRAFIE

S.J. Altenburg, C. Maierhofer, G. Mohr, K. Hilgenberg, A. Straße, A. Gumenyuk

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Outline



- Kurzvorstellung Projekt ProMoAM
- AM-Anlagen im Projekt
- Einführung in die Thermografie
- Anforderungen an die Thermografie
- In-situ Thermografie
 - SLM
 - LPA
- Zusammenfassung



Fragestellung:

Welche (ZfP-)Verfahren bzw. Verfahrenskombinationen erlauben eine prozessbegleitende Qualitätssicherung in der additiven Fertigung von Metallen?

















2D/3D Data Fusion zur Bestimmung der Zustandsgrößen des Bauteils als 3D-Darstellung











AM-Anlagen im Projekt

AM-Anlagen Selektives Laserschmelzen (SLM)





SLM280HL – SLM Solutions Group AG

- Bauraum: 280 × 280 × 360 mm³
- Max. Laserleistung: 400 W
- Fokusdurchmesser: < 100 μm
- Typ. Scangeschwindigkeit: 1000 mm/s
- Platformheizung bis zu 200 °C
- Layer-Control-System
- Melt-Pool-Monitoring
- Laser-Power-Monitoring

AM-Anlagen Laser Pulver Auftragschweißen (LPA)





Trumpf – TruLaser Cell 3000, Laser: TruDisk 16002 Yb:YAG

- Bauraum: 800 × 600 × 400 mm³
- Max. Laserleistung: 5 kW
- Max. Fokusdurchmesser: 3,8 mm
- Typ. Schweißgeschwindigkeit: 20 mm/s
- Schutzgas- und Pulverzufuhr über koaxiale Dreistrahldüse
- Pulverförderer: Medicoat Flowmotion
 Twin Vibrationsförderer

































Anforderungen an die Thermografie

Anforderungen an die Thermografie-Kamera



Einbaugeometrie



Fixierte Kamera

- Bauteilgröße durch Blickfeld eingeschränkt
- Auflösung bei großem Sichtfeld begrenzt
- Einfache Datenauswertung
- Fester Fokus begrenzt Einsatz

Anforderungen an die Thermografie-Kamera



Einbaugeometrie



Fixierte Kamera

- Bauteilgröße durch Blickfeld eingeschränkt
- Auflösung bei großem Sichtfeld begrenzt
- Einfache Datenauswertung
- Fester Fokus begrenzt Einsatz



Mitbewegte Kamera

- Beobachtungszeit durch Blickfeld eingeschränkt
- Hohe Auflösung bei kleinem Sichtfeld möglich
- Datenauswertung erfordert bekannten Scanpfad
- Schmelzbad ist immer im Fokus



• Minimale Auflösung: gewünschte Auflösung im Bauteil (z.B. 100 μm)



- Minimale Auflösung: gewünschte Auflösung im Bauteil (z.B. 100 μm)
- Weitere Einschränkung: Ausdehnung des zu messenden Temperaturprofils



- Minimale Auflösung: gewünschte Auflösung im Bauteil (z.B. 100 µm)
- Weitere Einschränkung: Ausdehnung des zu messenden Temperaturprofils





- Minimale Auflösung: gewünschte Auflösung im Bauteil (z.B. 100 µm)
- Weitere Einschränkung: Ausdehnung des zu messenden Temperaturprofils





- Minimale Auflösung: gewünschte Auflösung im Bauteil (z.B. 100 µm)
- Weitere Einschränkung: Ausdehnung des zu messenden Temperaturprofils





- Minimale Auflösung: gewünschte Auflösung im Bauteil (z.B. 100 µm)
- Weitere Einschränkung: Ausdehnung des zu messenden Temperaturprofils





- Minimale Auflösung: gewünschte Auflösung im Bauteil (z.B. 100 μ m) •
- Weitere Einschränkung: Ausdehnung des zu messenden Temperaturprofils •





- Minimale Auflösung: gewünschte Auflösung im Bauteil (z.B. 100 µm)
- Weitere Einschränkung: Ausdehnung des zu messenden Temperaturprofils





- Minimale Auflösung: gewünschte Auflösung im Bauteil (z.B. 100 µm)
- Weitere Einschränkung: Ausdehnung des zu messenden Temperaturprofils





- Minimale Auflösung: gewünschte Auflösung im Bauteil (z.B. 100 µm)
- Weitere Einschränkung: Ausdehnung des zu messenden Temperaturprofils





- Minimale Auflösung: gewünschte Auflösung im Bauteil (z.B. 100 µm)
- Weitere Einschränkung: Ausdehnung des zu messenden Temperaturprofils





- Minimale Auflösung: gewünschte Auflösung im Bauteil (z.B. 100 µm)
- Weitere Einschränkung: Ausdehnung des zu messenden Temperaturprofils



Anforderungen an die Thermografie-Kamera Spektralbereich & Dynamik





Anforderungen an die Thermografie-Kamera Spektralbereich & Dynamik





Anforderungen an die Thermografie-Kamera



Spektralbereich & Dynamik



Anforderungen an die Thermografie-Kamera Spektralbereich & Dynamik





Emissivität hängt ab von:

- Material
- Wellenlänge
- Temperatur
- Oxidation
- Winkel
- Rauigkeit



Selektives Laserstrahlschmelzen (SLM)























Ø Laserspot < 100 µm Scangeschwindigkeit: 1000 mm/s









Ø Laserspot < 100 µm Scangeschwindigkeit: 1000 mm/s

> $\rightarrow \Delta x < 40 \ \mu m$ $\rightarrow f > 10 \ kHz$

- Teilbild (160x128)
- MWIR 3-5 μm
- Bildrate bis 1 kHz
- 100 µm Auflösung
- AISI 316L









- Teilbild (160x128)
- MWIR 3-5 µm
- Bildrate bis 1 kHz
- 100 µm Auflösung
- AISI 316L









- Teilbild (160x128)
- MWIR 3-5 μm
- Bildrate bis 1 kHz
- 100 µm Auflösung
- AISI 316L









- Teilbild (160x128)
- MWIR 3-5 µm
- Bildrate bis 1 kHz
- 100 µm Auflösung
- AISI 316L









Teilbild (160x128)

- MWIR 3-5 μm
- Bildrate bis 1 kHz
- 100 µm Auflösung
- AISI 316L

In-situ Thermografie









Selektives Laserstrahlschmelzen (SLM)









Selektives Laserstrahlschmelzen (SLM)



Selektives Laserstrahlschmelzen (SLM)

BAM



\rightarrow Erstarrungsplateau im Zeitverlauf nicht erkennbar







MWIR, 1 kHz



\rightarrow Schmelzbad springt um ca. 10 Pixel von Bild zu Bild

Selektives Laserstrahlschmelzen (SLM)







Selektives Laserstrahlschmelzen (SLM)



Hochauflösende koaxiale Kamera

- max. 40 µm/Pixel
- min. 10 kHz
 - NIR, geringe Dynamik



Selektives Laserstrahlschmelzen (SLM)









falls alle Informationen zum Temperaturverlauf erfasst



Laser Pulver Auftragsschweißen (LPA)

Ø Laserspot: 3 mm Laserleistung 1,7kW Scangeschw.: 13,3 mm/s Duplex 2205











MWIR Kamera

- 3 5 µm
- 300 µm/Pixel
- 1000 Hz

VIS Kamera (NIR)

- 815 nm
- 50 µm/Pixel
- 10000 Hz

Ø Laserspot: 3 mm Laserleistung 1,7kW Scangeschw.: 13,3 mm/s Duplex 2205









MWIR Kamera

- 3–5µm
- 300 µm/Pixel
- 1000 Hz

VIS Kamera (NIR)

- 815 nm
- 50 µm/Pixel
- 10000 Hz

Ø Laserspot: 3 mm Laserleistung 1,7kW Scangeschw.: 13,3 mm/s Duplex 2205









Ø Laserspot: 3 mm Laserleistung 1,7kW Scangeschw.: 13,3 mm/s Duplex 2205







Einfache Kalibrierung

- Referenz: Solidus Temp.
- MWIR: Emissivität
- NIR: Radiometr. Modell



- → Dynamik der NIR-Kamera ist nicht ausreichend
- → Bildwiederholrate von ca.
 200 Hz ist ausreichend

In-situ Thermografie, LPA Ausblick: Mitbewegte Kamera



Ø Laserspot: 3 mm, Laserleistung 1,5kW Scangeschw.: 20 mm/s, AISI 316L

VIS Kamera (NIR)

- 880 nm
- 27 µm/Pixel
- (450 x 200) Pixel
- 250 Hz



In-situ Thermografie, LPA Ausblick: Mitbewegte Kamera





2 mm

- VIS Kamera (NIR)
- 880 nm
- 27 µm/Pixel
- (450 x 200) Pixel
- 250 Hz
- \rightarrow Prinzip funktioniert
- → Dynamik der NIR-Kamera ist nicht ausreichend
- → Kompakte SWIR-Kamera (0,9 µm – 1,7 µm)

Ø Laserspot: 3 mm, Laserleistung 1,5kW Scangeschw.: 20 mm/s, AISI 316L





BAM-Projekt ProMoAM

Projektziele:

- In-situ-Monitoring verschiedener Metall-AM-Verfahren mit verschiedenen ZfP-Verfahren
- Korrelation der Ergebnisse mit Referenzverfahren
- Datenfusion zur Defekterkennung
- Evaluation geeigneter Verfahren bzw. Verfahrenskombinationen zur in-situ Qualitätssicherung AMgefertigter Metallbauteile



BAM-Projekt ProMoAM

Projektziele:

- In-situ-Monitoring verschiedener Metall-AM-Verfahren mit verschiedenen ZfP-Verfahren
- Korrelation der Ergebnisse mit Referenzverfahren
- Datenfusion zur Defekterkennung
- Evaluation geeigneter Verfahren bzw. Verfahrenskombinationen zur in-situ Qualitätssicherung AMgefertigter Metallbauteile

Thermografie

Angepasste Kamerasysteme:

SLM:

- Schmelzbadkontrolle mit koaxialer NIR-Hochgeschwindigkeitskamera
- Überwachung des Abkühlverhaltens mit hoher Temperaturdynamik

LPA:

 Prozessüberwachung mit kompakter "Universalkamera" (mittlere räumliche und zeitliche Auflösung sowie Dynamik)



BAM-Projekt ProMoAM

Thermografie

Projektziele:

Angepasste Kamerasysteme:

—	IN-SITU-MON			
	Metall-AM-V			þaxialer
	verschieden	Vielen Dank für die Aufmerksamkeitl	kamera	
_	Korrelation	VIEIEII Dalik iui ule Autherksanikeit:		erhaltens
	Referenzver			mik
_	Datenfusion			
_	Evaluation geeigneter Verfahren bzw. Verfahrenskombinationen zur		 Prozessüberwachung mit 	:
			kompakter "Universalkamera"	

in-situ Qualitätssicherung AMgefertigter Metallbauteile

Prozessüberwachung mit kompakter "Universalkamera" (mittlere räumliche und zeitliche Auflösung sowie Dynamik)