

# Thermografische Super Resolution mit 2D-strukturierter Erwärmung

Julien LECOMPAGNON<sup>1</sup>, Samim AHMADI<sup>1</sup>, Philipp HIRSCH<sup>1</sup>, Mathias ZIEGLER<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

Kontakt E-Mail: [julien.lecompagnon@bam.de](mailto:julien.lecompagnon@bam.de)

## Kurzfassung

Thermografische Super Resolution ermöglicht die Auflösung von Defekten/Inhomogenitäten unterhalb des klassischen Limits, welches durch die Diffusionseigenschaften der thermischen Wellenausbreitung bestimmt wird. Basierend auf einer Kombination aus der Anwendung spezieller Abtaststrategien und einer anschließenden numerischen Optimierungsschritt bei der Datenauswertung hat sich die thermografische Super Resolution bereits bei der Detektion von 1D-Defekten gegenüber den Standard-Thermografieverfahren als überlegen erwiesen. In unserer Arbeit erweitern wir die Möglichkeiten der Methode zur effizienten Detektion und Auflösung von Defektquerschnitten mit einer vollständig 2D-strukturierten Erwärmung. Der experimentelle Ansatz basiert auf einer wiederholten räumlich strukturierten Erwärmung durch einen Hochleistungslaser. In einem zweiten Nachbearbeitungsschritt werden mehrere kohärente Messungen mittels mathematischer Optimierung und unter Ausnutzung der (Joint-) Sparsity der Defekte innerhalb des Prüfkörpers kombiniert. Als Ergebnis kann eine 2D-sparse Defekt-/ Inhomogenitätskarte erhalten werden. Da die Kombination von räumlich strukturierter Erwärmung und anschließender numerischer Kombination mehrerer kohärenter Messungen nicht nur die Auflösung verbessert, sondern auch die Messkomplexität drastisch erhöht, werden verschiedene Scanstrategien untersucht. Abschließend werden die erhaltenen Ergebnisse mit denen konventioneller thermografischer Prüfverfahren verglichen.

# Thermografische Super Resolution mit 2D-strukturierter Erwärmung

Julien Lecompanion<sup>a</sup>, S. Ahmadi<sup>a</sup>, P.D. Hirsch<sup>a</sup> and M. Ziegler<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), 12200 Berlin, Germany

**Problem:**

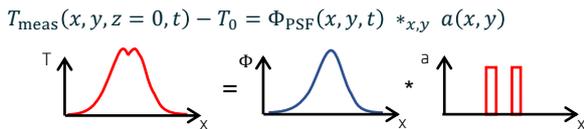
- Niedrige Auflösung konventioneller thermografischer ZfP bei internen Defekten
- Laserscanning Super Resolution (SR) Methodik bisher noch auf 1D beschränkt

**Lösungsansatz:**

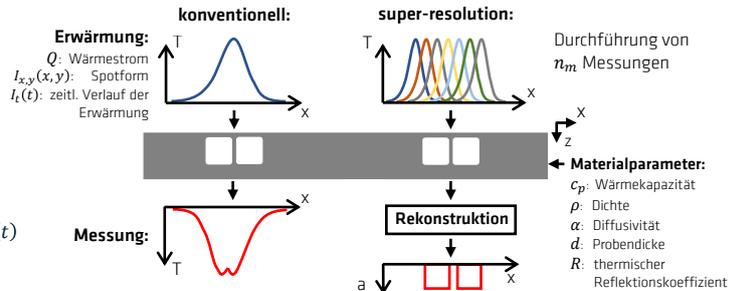
- Erweiterung der SR-Methodik auf vollflächige Auswertung (2D)

## PHOTOTHERMISCHE SUPER RESOLUTION REKONSTRUKTION

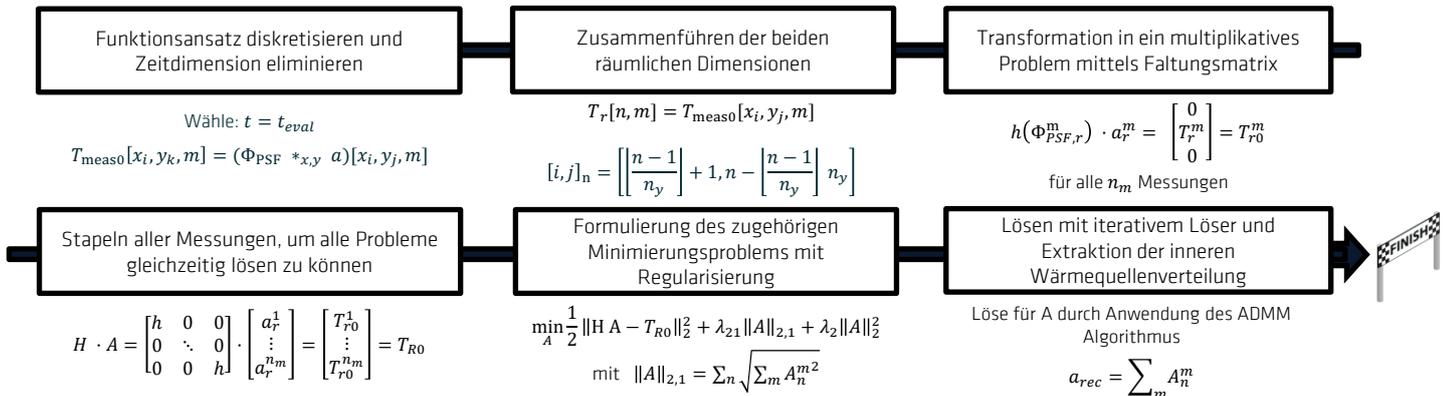
Green'scher Funktionsansatz zur Beschreibung thermischer Diffusion:

$$T_{\text{meas}}(x, y, z = 0, t) - T_0 = \Phi_{\text{PSF}}(x, y, t) *_{x,y} a(x, y)$$


mit  $\Phi_{\text{PSF}}(x, y, t) = \frac{2 \cdot Q}{c_p \rho (4 \pi \alpha t)^{3/2}} \cdot e^{-\frac{(x-\bar{x})^2 + (y-\bar{y})^2}{4 \alpha t}} \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} R^{2n+1} e^{-\frac{(znd)^2}{4 \alpha t}} *_{t} I_t(t)$   
 und  $a(x, y) = a_0(x, y) *_{x,y} I_{x,y}(x, y)$

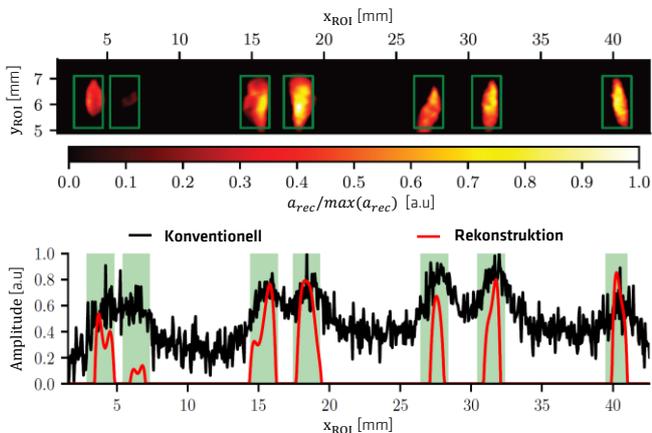


## 2D-REKONSTRUKTIONSMETHODIK

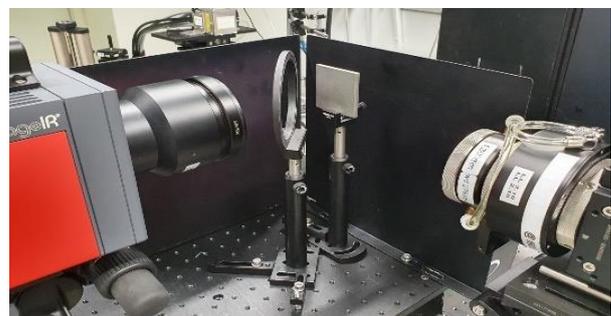


## VERSUCHSAUFBAU UND ERGEBNISSE

- Prüfkörper:**
  - Additiv gefertigt aus 316L Edelstahl
  - ROI: 43.7 mm x 10 mm
- Erwärmung:**
  - Punktweise an 374 Messpositionen
- Erwärmungsquelle:**
  - 500 W fasergekoppelter Diodenlaser (940 nm)
  - FWHM-Spotgröße: 1.5 mm
  - Pulsdauer: 0.2 s
- MWIR-Infrarotkamera:**
  - Infratec ImageIR 9300
  - Bildwiederholrate: 100 Hz
  - Pixelauflösung: 52  $\mu\text{m}$ .



**Abbildung 1:** Rekonstruktionsergebnis für ein Defektmuster mit 2 mm breiten Defekten und abnehmenden Abständen zueinander. Die Rekonstruktion erfolgte auf Grundlage von 374 Punktmessungen mit einem 1.5 mm FWHM-Spotdurchmesser ( $\rho_{\text{ADMM}} = 16$ ,  $\lambda_{21} = 950$ ,  $\lambda_2 = 60$ ). Schnittansicht bei  $y = 5,93$  mm (unten). Defektpositionen/-geometrien sind als grüne Balken eingezeichnet.



**Abbildung 2:** Versuchsaufbau: Diodenlaser mit 500 W, Ausgangsleistung und 940 nm Wellenlänge (rechts), Prüfkörper mit dichroitischen Spiegel davor (Mitte) und MWIR-Infrarotkamera (links). Der Prüfkörper wird mittels zwei Linearachsen bewegt, um ein punktwises Scannen seiner Oberfläche zu ermöglichen.

**Literatur:**

- (1) S. Ahmadi, J. Lecompanion; et al. Laser excited super resolution thermal imaging for nondestructive inspection of internal defects, Scientific Reports, 2020, 10
- (2) S. Ahmadi, G. Thummerer et al. Multi-dimensional reconstruction of internal defects in additively manufactured steel using photothermal super resolution combined with virtual wave based image processing, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021
- (3) K. Cole, J. Beck et al.: Heat Conduction Using Greens Functions, CRC Press, 2010
- (4) S. Boyd, N. Parikh et al., Distributed Optimization and Statistical Learning via the Alternating Direction Method of Multipliers, Foundations and Trends in Machine Learning, 2011, 3

Sicherheit in Technik und Chemie