

# Neue Verfahren der thermografischen Super Resolution mit strukturierter 1D-Lasererwärmung

Samim AHMADI<sup>1</sup>, Julien LECOMPAGNON<sup>1</sup>, Philipp Daniel HIRSCH<sup>1</sup>,  
Peter BURGHOLZER<sup>2</sup>, Peter JUNG<sup>3</sup>, Giuseppe CAIRE<sup>3</sup>, Mathias ZIEGLER<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

<sup>2</sup> RECENDT GmbH, Linz, Österreich

<sup>3</sup> Technische Universität Berlin, Berlin

Kontakt E-Mail: samim.ahmadi@bam.de

## Kurzfassung

Die thermografische ZfP basiert auf der Wechselwirkung von thermischen Wellen mit Inhomogenitäten. Die Ausbreitung von thermischen Wellen von der Wärmequelle zur Inhomogenität und zur Detektionsoberfläche entsprechend der thermischen Diffusionsgleichung führt dazu, dass zwei eng beieinander liegende Defekte fälschlicherweise als ein Defekt im gemessenen Thermogramm erkannt werden können. Um diese räumliche Auflösungsgrenze zu durchbrechen, also eine Super Resolution zu realisieren, kann die Kombination von räumlich strukturierter Erwärmung und numerischen Verfahren des Compressed Sensings verwendet werden.

Für unsere Arbeiten benutzen wir Hochleistungs-Laser im Kilowatt-Bereich um die Probe entweder hochaufgelöst entlang einer Linie (1D) abzurastern oder strukturiert zu erwärmen. Die Verbesserung des räumlichen Auflösungsvermögens zur Defekterkennung hängt dann im klassischen Sinne direkt von der Anzahl der Messungen ab. Mithilfe des Compressed Sensings und Vorkenntnissen über das System ist es jedoch möglich die Anzahl der Messungen zu reduzieren und trotzdem Super Resolution zu erzielen. Wie viele Messungen notwendig sind und wie groß der Auflösungsgewinn gegenüber der konventionellen thermografischen Prüfung mit flächiger Erwärmung ist, hängt von einer Reihe von Messparametern, der Messstrategie, Probeneigenschaften und den verwendeten Rekonstruktionsalgorithmen ab.

Unsere Studien befassen sich mit dem Einfluss der experimentellen Parameter, wie z.B. der Pulslänge der Laserbeleuchtung und der Größe des Laserspots. Weiterhin haben wir uns mit der Wahl der Parameter in der Rekonstruktion auseinandergesetzt, die einen Einfluss auf das im Compressed Sensing zugrundeliegende Minimierungsproblem haben. Für jeden getesteten Parametersatz wurde eine Rekonstruktionsqualität berechnet. Schließlich wurden die Defektrekonstruktionen basierend auf den Parametersätzen verglichen, sodass eine Parameterwahl für hohe Rekonstruktionsqualitäten mit thermografischer Super Resolution empfohlen werden kann.

# Neue Verfahren der thermografischen Super Resolution mit strukturierter 1D-Lasererwärmung

Samim Ahmadi <sup>(1)</sup>, J. Lecomagnon <sup>(1)</sup>, P. Hirsch <sup>(1)</sup>, P. Burgholzer <sup>(2)</sup>, P. Jung <sup>(3)</sup>, G. Caire <sup>(3)</sup>, M. Ziegler <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), 12200 Berlin, Germany.

<sup>(2)</sup> Research Center for Non Destructive Testing (RECENDT), 4040 Linz, Austria.

<sup>(3)</sup> Technische Universität Berlin, Communications and Information Theory, 10587 Berlin, Germany.

Bundesanstalt für  
Materialforschung  
und -prüfung

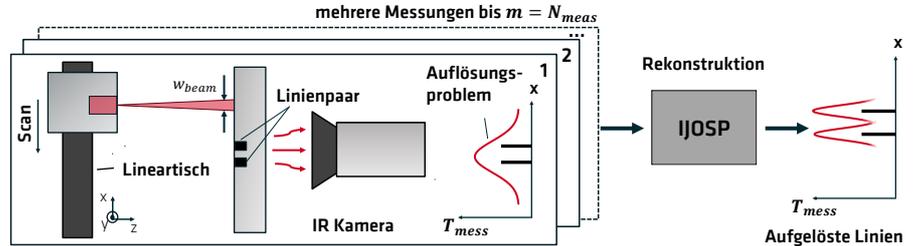
## MOTIVATION: ÖRTLICHES AUFLÖSUNGSPROBLEM IN DER THERMOGRAFIE

### PROBLEM

- Methode finden, die die räumliche Auflösung erhöht, die durch die diffuse Natur der Wärmeleitung begrenzt ist

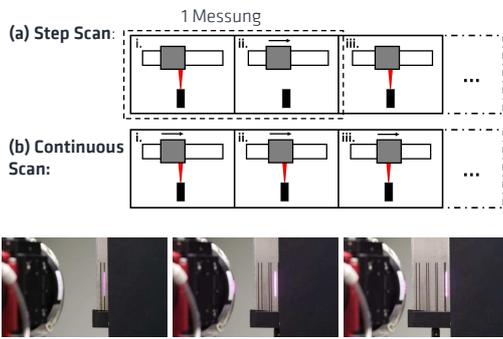
### ANSATZ

- Mehrere Messungen an verschiedenen Positionen mit einer einzigen Laserlinie und (a) Step oder (b) Continuous Scan
- Nichtlineare iterative joint sparsity (IJOSP) Rekonstruktion



## SUPER RESOLUTION REKONSTRUKTION

### 1. BESCHREIBUNG DES EXPERIMENTS



### Messparameter (Parameterstudien):

- Laserlinienbreite:  $w_{beam}$  (0.38, 0.75, 1.5 mm)
- Pulslänge (für Step Scan):  $t_p$  (50 - 1000 ms)
- Scangeschwindigkeit (für continuous Scan):  $v_{scan}$  (1, 10, 100 mm/s)
- Positionsshift zwischen den Messungen: (a) step:  $\delta x_s = w_{beam}/2$ , (b) cont:  $\delta x_c = v_{scan}/f_{cam}$

### 3.a) PARAMETERSTUDIEN: EXPERIMENT

#### IJOSP Algorithmus [2]:

$$\hat{u} = \arg \min_u \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{N_{meas}} \sum_{n=1}^{N_x} |(\Phi \cdot u^m)[n] - T_{MT}^m[n]|^2 + \alpha_1 \|u\|_{2,1} + \frac{\alpha_2}{2} \|u\|_2^2$$

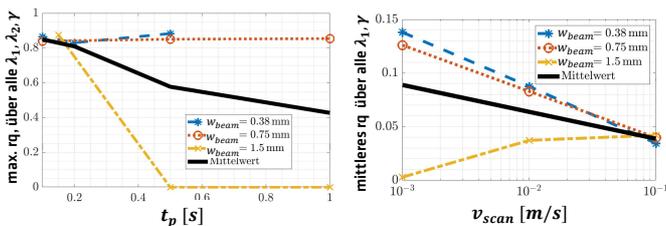
- $\ell_{2,1}$ -Regularisierung bevorzugt Pixel, die bei mehreren Messungen aktive Elemente vorweisen:

$$\|u\|_{2,1} = \sum_{n=1}^{N_x} \sqrt{\sum_{m=1}^{N_{meas}} |u^m[n]|^2}$$

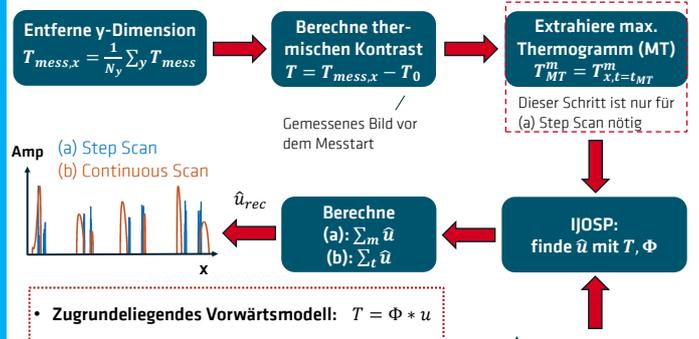
#### Bewertung der 1D Rekonstruktionsergebnisse:

$$rq = \begin{cases} \frac{\max(u_{rec} \cdot u_{rec})}{\max(u_{rec} \cdot u_{rec})}, & 8 \leq N_{peaks} \leq 16 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Kreuzkorrelation



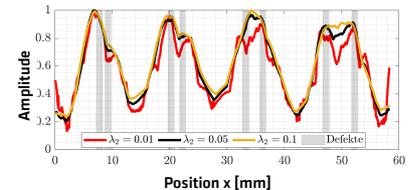
### 2. MODELLBASIERTE REKONSTRUKTION



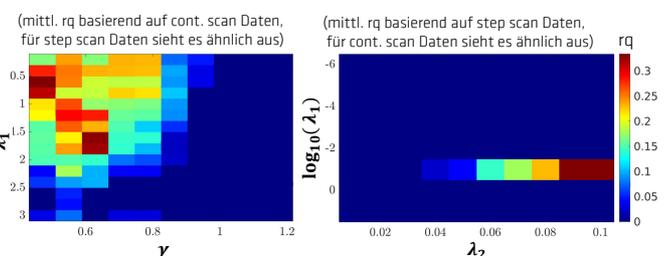
Finde  $\hat{u}$ , sodass  
 $T - \Phi * \hat{u} \rightarrow 0$

### 3.b) PARAMETERSTUDIEN: REGULARISIERUNG

#### Einfluss von $\lambda_2$ :



#### Variation der Regularisierungsparameter $\lambda_1, \lambda_2$ und der Schrittweite $\gamma$ :



→ Rekonstruktionsqualität hängt stark von den experimentellen und Post-Processing Parametern ab

## ZUSAMMENFASSUNG, AUSBLICK UND REFERENZEN

- Auflösung dicht beieinanderliegender Defekte durch thermografische Super-Resolution mit **Aspektverhältnisse bis zu 1:8** (Abstand zwischen zwei Defekten: Defekttiefe); Auflösungsgrenze bei konventionellen Verfahren, wie z.B. Blitzthermografie: 1:1
- Höchste Rekonstruktionsqualität durch möglichst schmale Laserlinie, kurzen Puls/geringe Scan-Geschwindigkeit und geeignete Wahl der Regularisierungsparameter
- Ausblick: Arbeiten an **multidimensionaler Rekonstruktion: 2D und 3D (photo-thermische Tomografie)**

- [1] Kevin Cole et al. (2010): "Heat conduction using Greens functions". Taylor & Francis.
- [2] Peter Burgholzer et al. (2017): "Super-resolution thermographic imaging using blind structured illumination". Applied Physics Letters 111, 031908.
- [3] Samim Ahmadi et al. (2020): "Super resolution laser line scanning thermography". Optics and Lasers in Engineering, 134, 106279.
- [4] Samim Ahmadi et al. (2020): "Laser excited super resolution thermal imaging for nondestructive inspection of internal defects". Scientific Reports, 10(1), 1-8.