

Hochaufgelöste thermografische Detektion eingeschlossener Defekte mit Hilfe von 2D-strukturierten Beleuchtungsmustern

Julien LECOMPAGNON¹, Philipp HIRSCH¹, Christian RUPPRECHT²,
Mathias ZIEGLER¹

¹ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

² Technische Universität Berlin, Berlin

Kontakt E-Mail: julien.lecompagnon@bam.de

Kurzfassung

Für die aktive Thermografie als zerstörungsfreie Prüfmethode galt lange Zeit die Faustformel, dass die Auflösung interner Defekte/Inhomogenitäten auf ein Verhältnis von Defekttiefe/Defektgröße ≤ 1 beschränkt ist. Die Ursache hierfür liegt in der diffusiven Natur der Wärmeleitung in Festkörpern. Sogenannte Super-Resolution-Ansätze erlauben seit Kurzem die Überwindung dieser physikalischen Grenze um ein Vielfaches. Damit ergibt sich die attraktive Möglichkeit die Thermografie von einem rein oberflächensensitiven Prüfverfahren hin zu einem Verfahren mit verbesserter Tiefenreichweite zu entwickeln. Wie weit diese Entwicklung getrieben werden kann, ist Gegenstand aktueller Forschung.

Wir konnten bereits zeigen, dass diese klassische Grenze für 1D- und 2D-Defektgeometrien mit Hilfe des Abscannens des Prüfkörpers mittels einzelner Laserspots und der anschließenden Anwendung von photothermischer Super-Resolution-Rekonstruktion überwunden werden kann. Bei dieser Methode wird eine Kombination aus sequenzieller räumlich strukturierter Beleuchtung und numerischen Optimierungsmethoden eingesetzt. Dies geschieht allerdings auf Kosten der experimentellen Komplexität, die zu einer langen Messdauer, großen Datensätzen und langwieriger numerischer Auswertung führt.

In dieser Arbeit berichten wir über einen neuen experimentellen Ansatz, bei dem räumlich strukturierte 2D-Beleuchtungsmuster in Verbindung mit Compressed-Sensing und Computational-Imaging-Methoden verwendet werden, um die experimentelle Komplexität deutlich zu verringern und die Methode für die Untersuchung größerer Prüfflächen nutzbar zu machen.

Der experimentelle Ansatz basiert dabei auf der wiederholten (blinden) photothermischen Anregung mit räumlich strukturierten 2D-Mustern unter Verwendung moderner Projektortechnik und eines Hochleistungslasers. In der anschließenden numerischen Rekonstruktion werden mehrere Messungen unter Ausnutzung der Joint-Sparsity der Defekte innerhalb des Prüfkörpers mittels nichtlinearer konvexer Optimierungsmethoden kombiniert. Als Ergebnis kann eine 2D-sparse Defekt-/Inhomogenitätskarte erstellt werden.



24.05.2022

Hochaufgelöste thermografische Detektion eingeschlossener Defekte mit Hilfe von 2D-strukturierten Beleuchtungsmustern

Julien Lecompañon¹, Philipp Daniel Hirsch¹, Christian Rupprecht²
und Mathias Ziegler¹

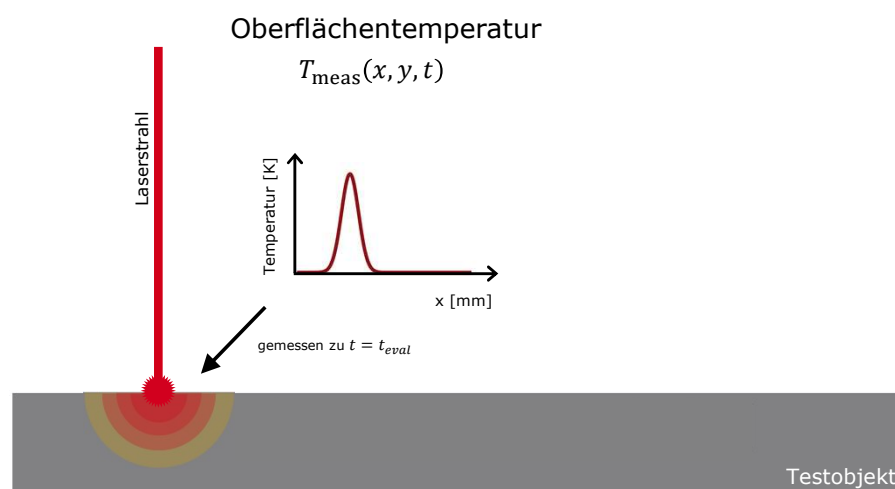
1) Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), 12200 Berlin

2) Technische Universität Berlin, 10623 Berlin

www.bam.de

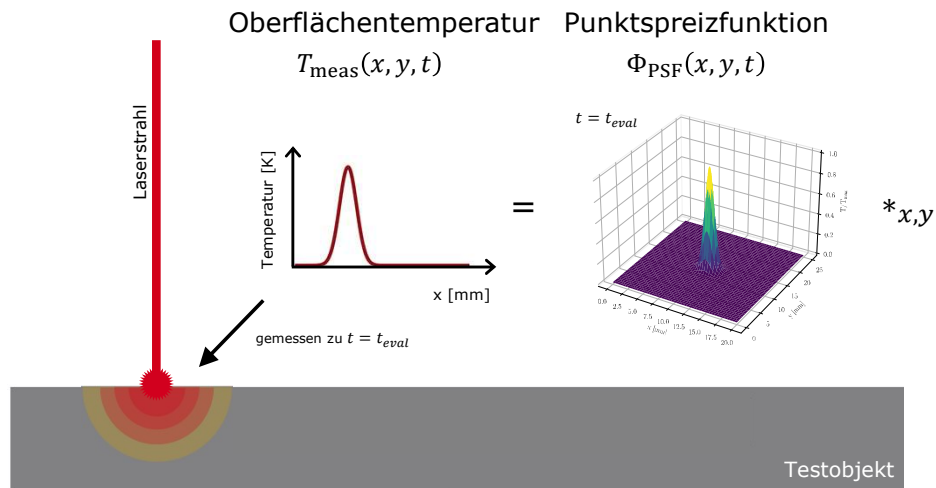
1

Motivation Photothermische Super-Resolution Rekonstruktion



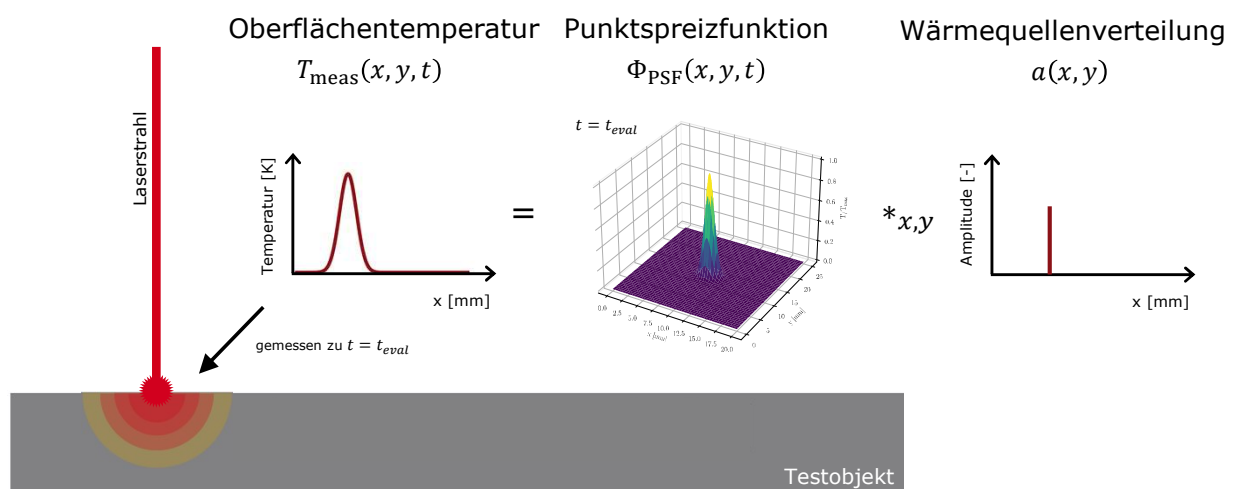
2

Motivation Photothermische Super-Resolution Rekonstruktion



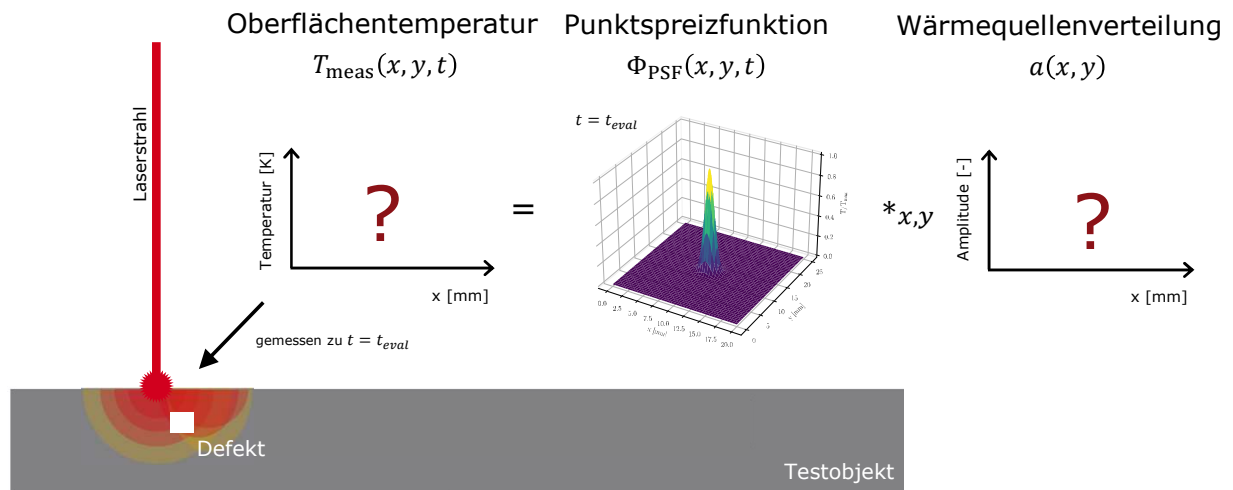
3

Motivation Photothermische Super-Resolution Rekonstruktion



4

Motivation Photothermische Super-Resolution Rekonstruktion



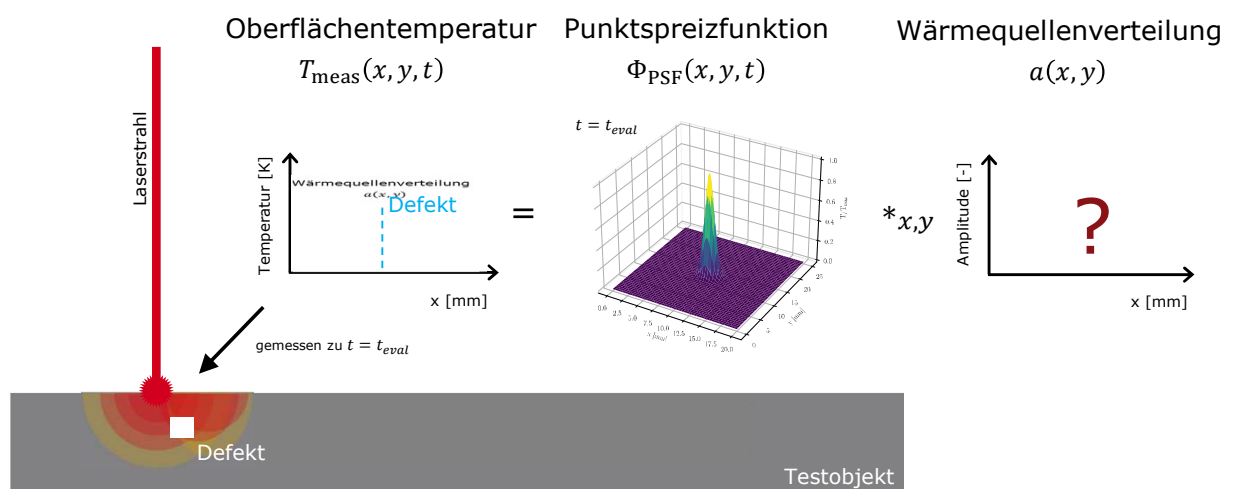
24.05.2022

Thermografische Detektion eingeschlossener Defekte mit Hilfe von 2D-strukturierten Beleuchtungsmustern

2

5

Motivation Photothermische Super-Resolution Rekonstruktion



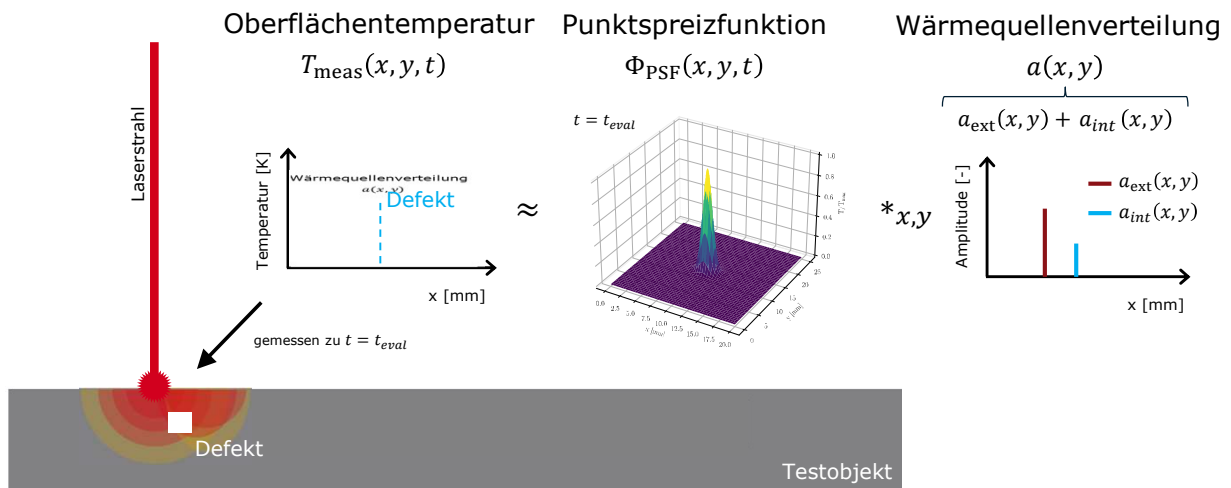
24.05.2022

Thermografische Detektion eingeschlossener Defekte mit Hilfe von 2D-strukturierten Beleuchtungsmustern

2

6

Motivation Photothermische Super-Resolution Rekonstruktion



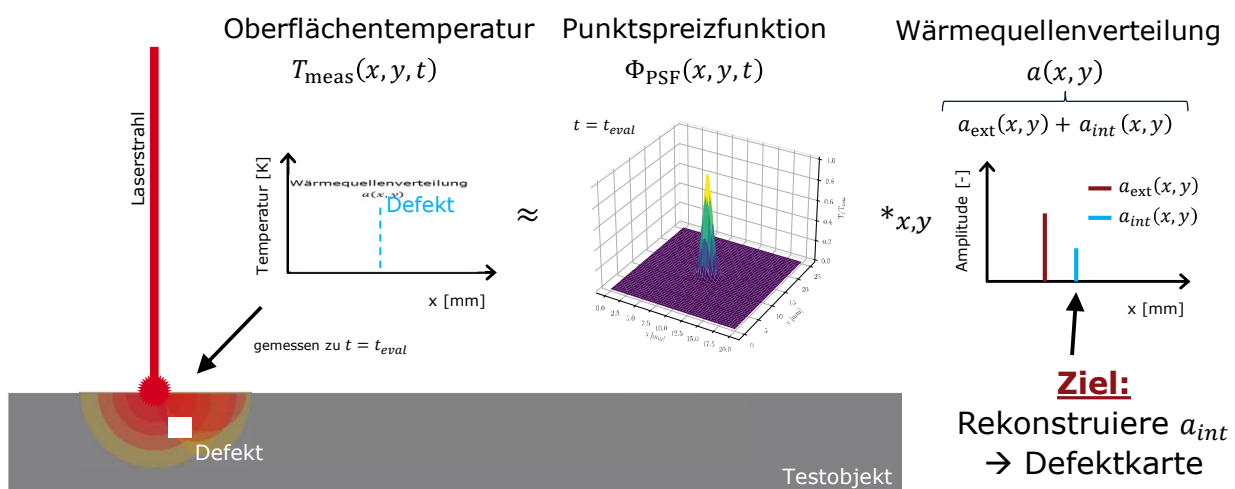
24.05.2022

Thermografische Detektion eingeschlossener Defekte mit Hilfe von 2D-strukturierten Beleuchtungsmustern

2

7

Motivation Photothermische Super-Resolution Rekonstruktion



24.05.2022

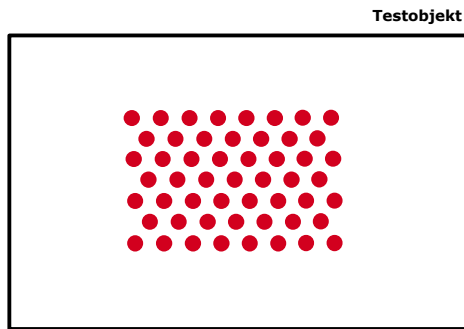
Thermografische Detektion eingeschlossener Defekte mit Hilfe von 2D-strukturierten Beleuchtungsmustern

2

8

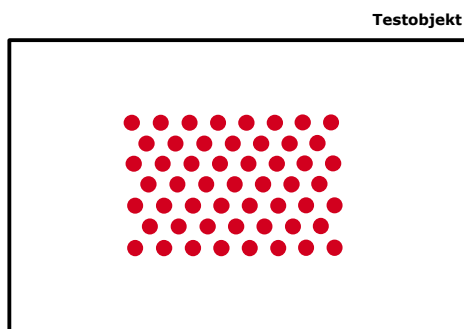
Flächig strukturierte Beleuchtung Messstrategien

Punktweiser Scan:

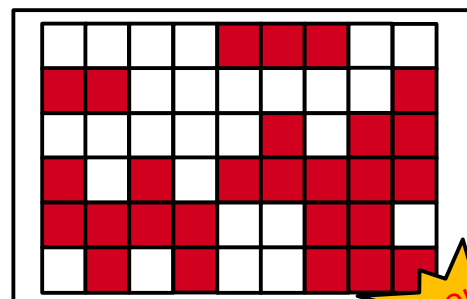


Flächig strukturierte Beleuchtung Messstrategien

Punktweiser Scan:

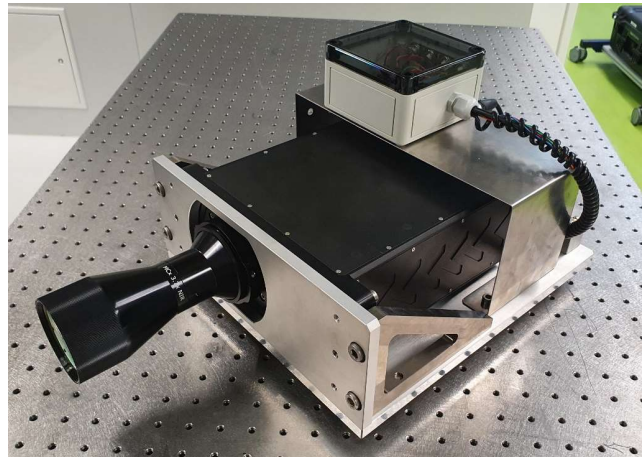


Projektion von 2D-Mustern:



Vollflächige strukturierte Beleuchtung Equipment: DMD-Projektor

- Basiert auf DLP-chip DLP650LNIR von Texas Instruments
- 1280 × 800 Pixel; 10.8 μm Pixelgröße
- 86 W max. optische Ausgangsleistung @ 270 W optische Ausgangsleistung (!)
- Objektive auswechselbar

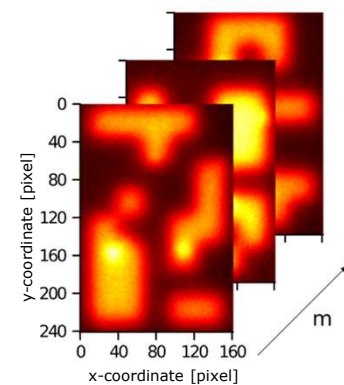


11

Photothermische Super-Resolution Rekonstruktion Visualisierung

Messdaten
(zu ermitteln)

$$= T_{\text{meas}}^m(x, y, t = t_{\text{eval}})$$



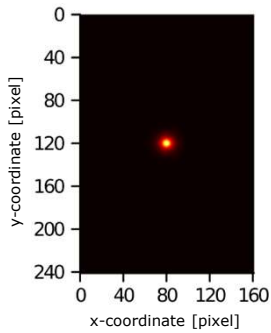
12

Photothermische Super-Resolution Rekonstruktion BAM

Visualisierung

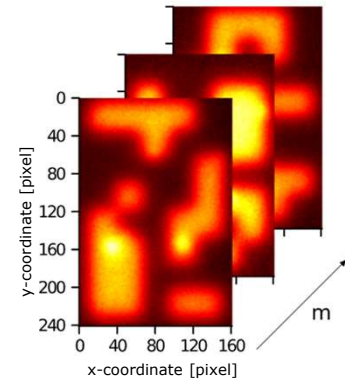
Wärmeausbreitung
(vorab ermittelbar)

$$\Phi_{\text{PSF}}(x, y, t = t_{\text{eval}})$$



Messdaten
(zu ermitteln)

$$= T_{\text{meas}}^m(x, y, t = t_{\text{eval}})$$



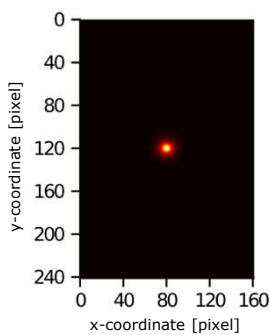
13

Photothermische Super-Resolution Rekonstruktion BAM

Visualisierung

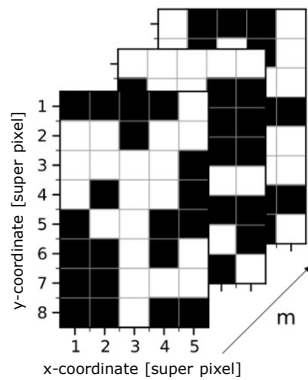
Wärmeausbreitung
(vorab ermittelbar)

$$\Phi_{\text{PSF}}(x, y, t = t_{\text{eval}})$$



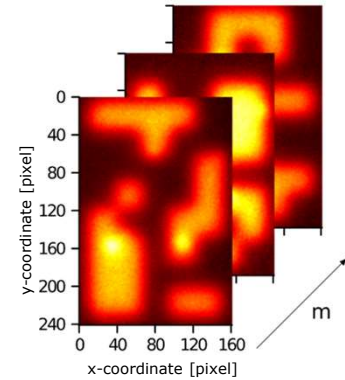
Anregung
(vom Anwender bestimmt)

$$*_{x,y} a_{\text{ext}}^m(x, y)$$



Messdaten
(zu ermitteln)

$$= T_{\text{meas}}^m(x, y, t = t_{\text{eval}})$$

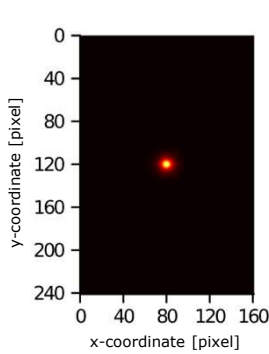


14

Photothermische Super-Resolution Rekonstruktion BAM Visualisierung

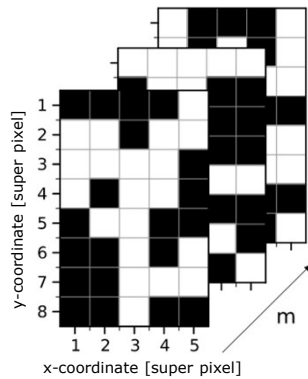
Wärmeausbreitung
(vorab ermittelbar)

$$\Phi_{\text{PSF}}(x, y, t = t_{\text{eval}})$$



Anregung
(vom Anwender bestimmt)

$$*_{x,y} (a_{\text{ext}}^m(x, y) + a_{\text{int}}(x, y))$$

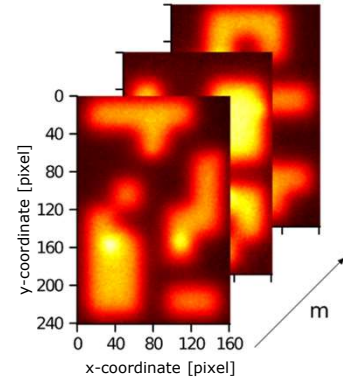


Defektkarte
(gesucht)



Messdaten
(zu ermitteln)

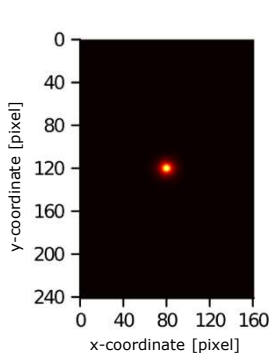
$$= T_{\text{meas}}^m(x, y, t = t_{\text{eval}})$$



Photothermische Super-Resolution Rekonstruktion BAM Visualisierung

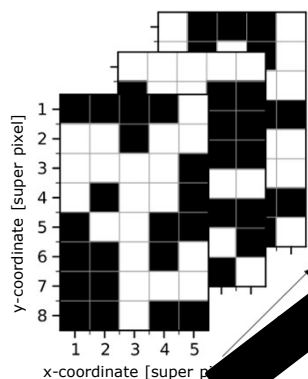
Wärmeausbreitung
(vorab ermittelbar)

$$\Phi_{\text{PSF}}(x, y, t = t_{\text{eval}})$$

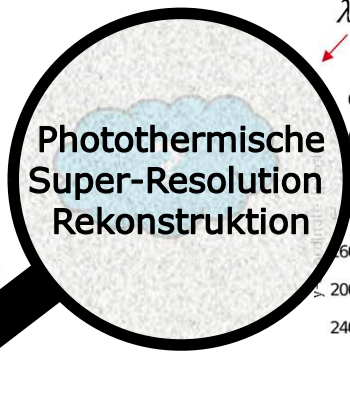


Anregung
(vom Anwender bestimmt)

$$*_{x,y} (a_{\text{ext}}^m(x, y) + a_{\text{int}}(x, y))$$

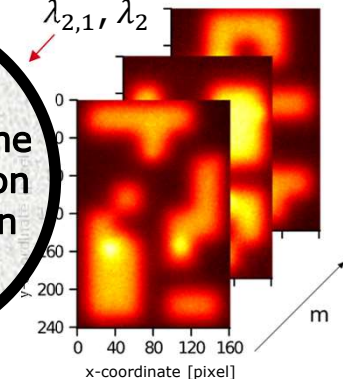


Defektkarte
(gesucht)



Messdaten
(zu ermitteln)

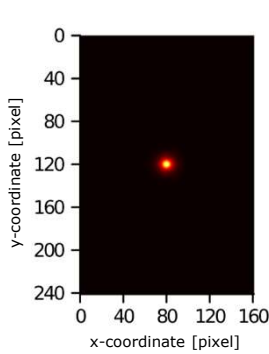
$$= T_{\text{meas}}^m(x, y, t = t_{\text{eval}})$$



Photothermische Super-Resolution Rekonstruktion Visualisierung

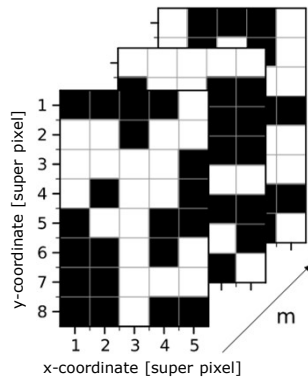
Wärmeausbreitung
(vorab ermittelbar)

$$\Phi_{\text{PSF}}(x, y, t = t_{\text{eval}})$$



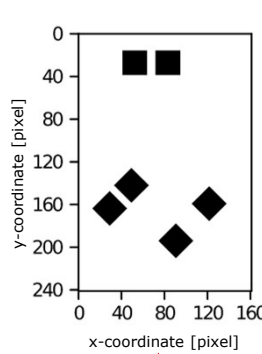
Anregung
(vom Anwender bestimmt)

$$*_{x,y} (a_{\text{ext}}^m(x, y) + a_{\text{int}}(x, y))$$

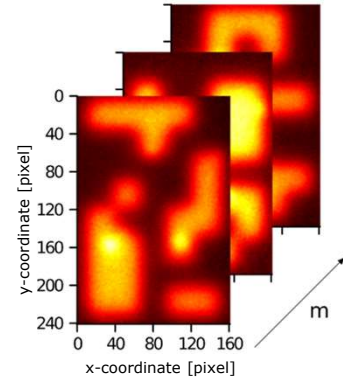


Defektkarte
(gesucht)

$$= T_{\text{meas}}^m(x, y, t = t_{\text{eval}})$$



Messdaten
(zu ermitteln)

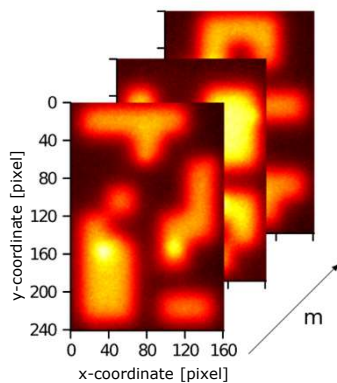


Rauschfrei!

17

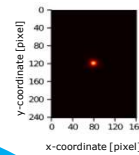
Defektrekonstruktion Inverses Problem und Vorwärtslösung

Messdaten

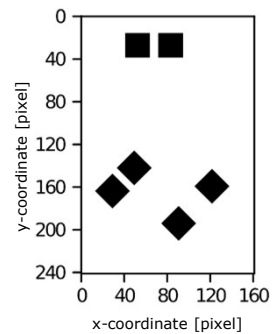


Inverses Problem:
(Blinde) Rekonstruktion
mit $\ell_{2,1}$, ℓ_2 Regularisierung

PSF als Input



Defektkarte



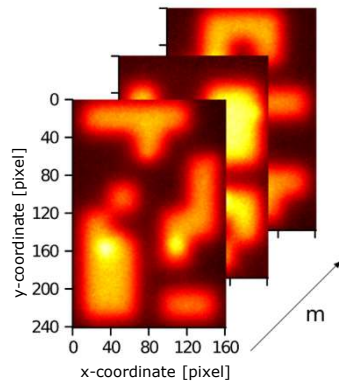
unterbestimmt

18

Defektrekonstruktion Inverses Problem und Vorwärtslösung



Messdaten

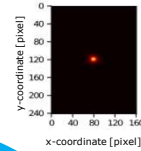


Inverses Problem:
(Blinde) Rekonstruktion
mit $\ell_{2,1}$, ℓ_2 Regularisierung

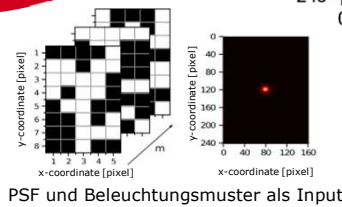
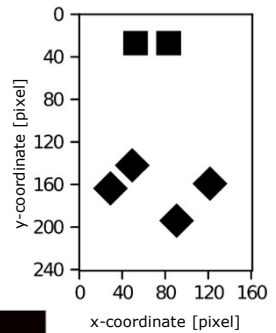


Vorwärtsproblem:
Generieren von
Simulationsdaten

PSF als Input

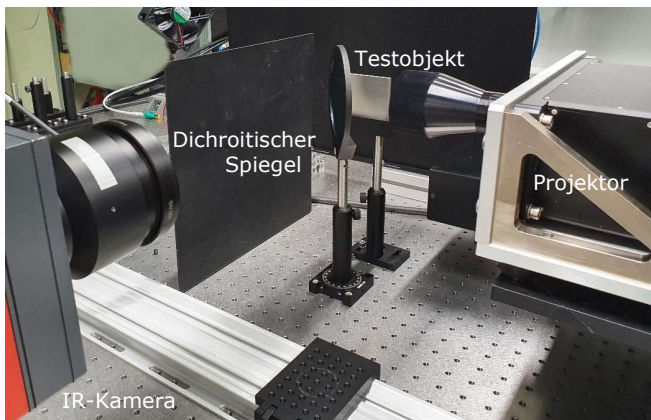


Defektkarte



PSF und Beleuchtungsmuster als Input

Methodenverifikation Equipment und Testaufbau



Testobjekt

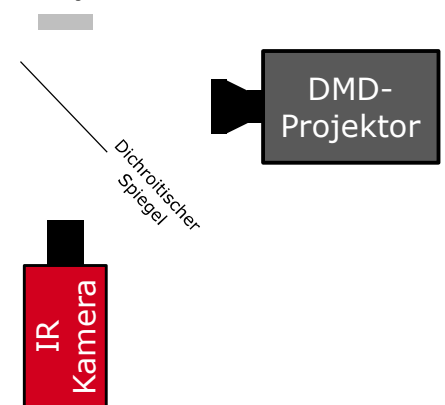


Abbildung reproduziert aus [4]

Methodenverifikation Equipment und Testaufbau

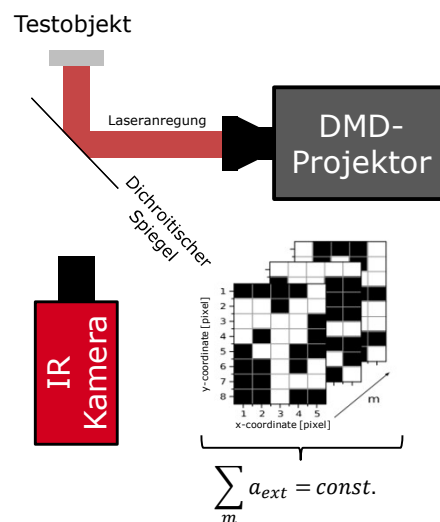
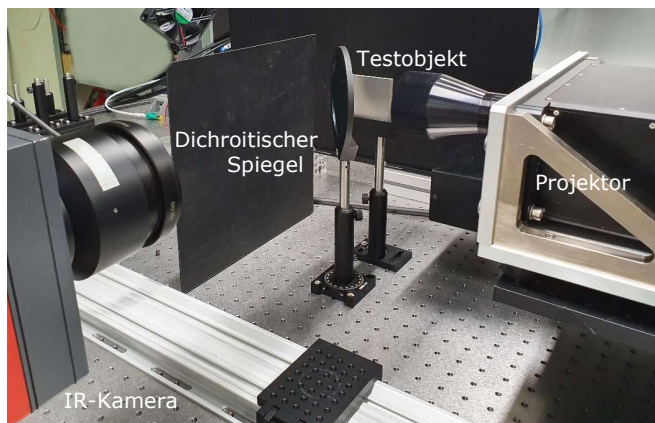


Abbildung reproduziert aus [4]

24.05.2022

Thermografische Detektion eingeschlossener Defekte mit Hilfe von 2D-strukturierten Beleuchtungsmustern

7

21

Methodenverifikation Equipment und Testaufbau

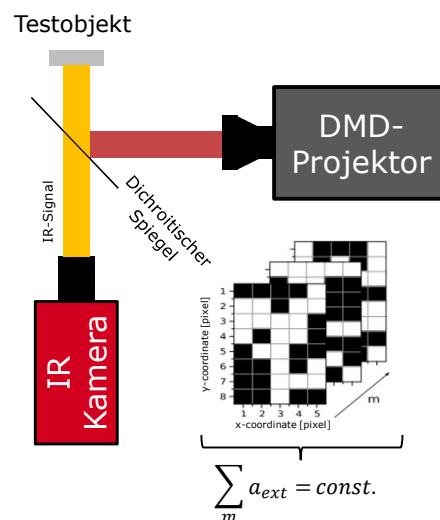
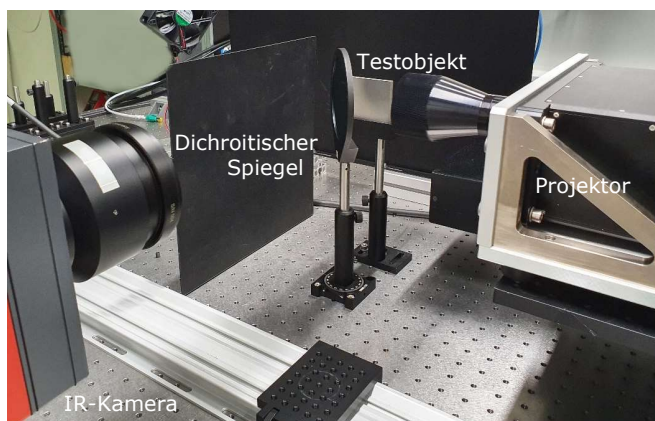


Abbildung reproduziert aus [4]

24.05.2022

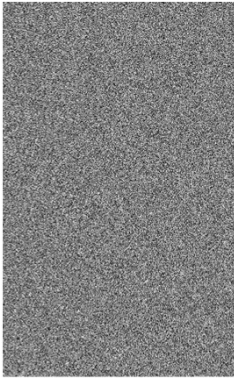
Thermografische Detektion eingeschlossener Defekte mit Hilfe von 2D-strukturierten Beleuchtungsmustern

7

22

Vollflächig strukturierte Beleuchtung: Zufallsmuster mit Pixelclustern

Pixelcluster: 1 Pixel
1280 x 800
 $d_{spix} = 0.02 \text{ mm}$
 $\hat{Q}_{optisch} / \text{Cluster} = 0.08 \text{ mW}$



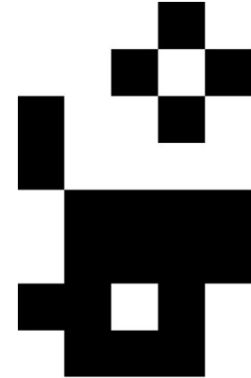
Pixelcluster: 10 Pixel
128 x 80
 $d_{spix} = 0.2 \text{ mm}$
 $\hat{Q}_{optisc} / \text{Cluster} = 8.39 \text{ mW}$



Pixelcluster: 40 Pixel
32 x 20
 $d_{spix} = 0.8 \text{ mm}$
 $\hat{Q}_{optisc} / \text{Cluster} = 134 \text{ mW}$

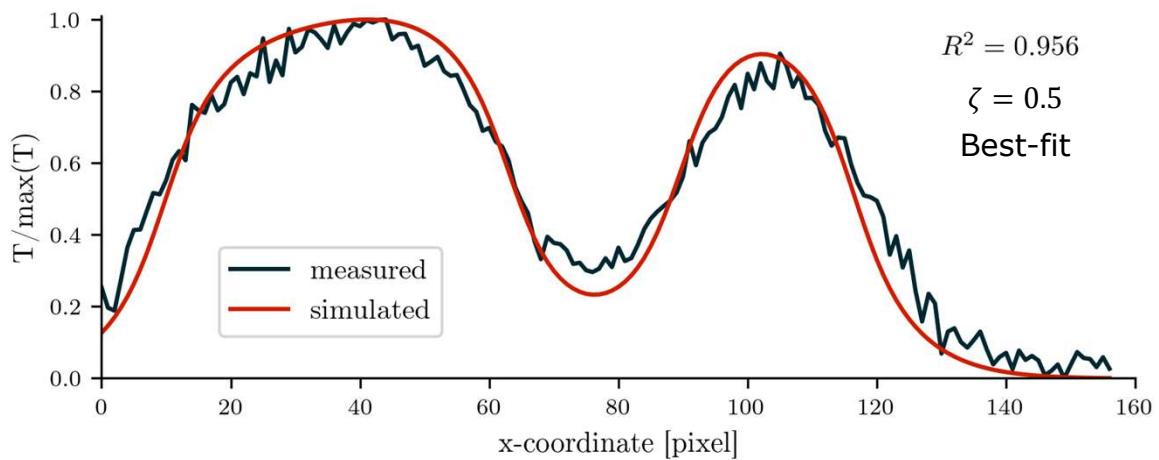


Pixelcluster: 160 Pixel
8 x 5
 $d_{spix} = 3.2 \text{ mm}$
 $\hat{Q}_{optisc} / \text{Cluster} = 2148 \text{ mW}$

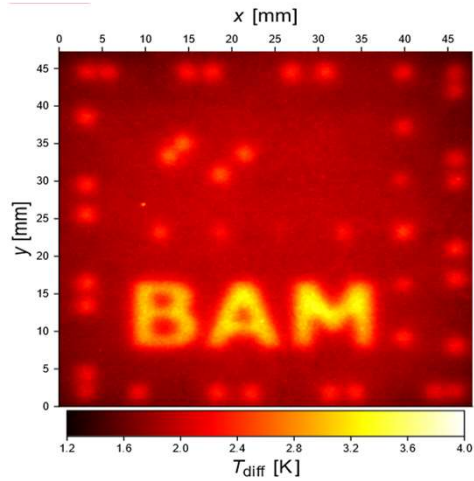


$\hat{Q}_{optisc} = 86 \text{ W}$

Vorwärtslösung Generierung synthetischer Messdaten möglich!



Rekonstruktion: Vergleich mit konventioneller Methodik



Konventionell: flächige Beleuchtung

Abbildungen reproduziert aus [2]

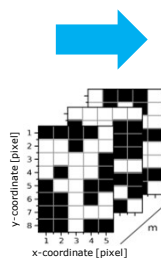
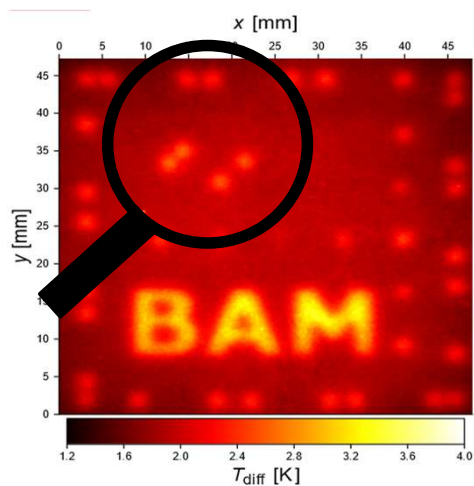
24.05.2022

Thermografische Detektion eingeschlossener Defekte mit Hilfe von 2D-strukturierten Beleuchtungsmustern

10

25

Rekonstruktion: Vergleich mit konventioneller Methodik



Konventionell: flächige Beleuchtung

Abbildungen reproduziert aus [2]

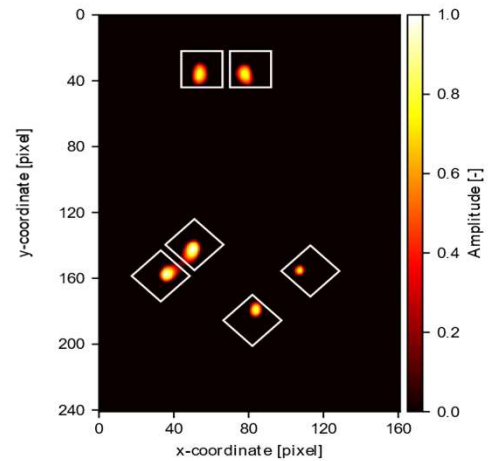
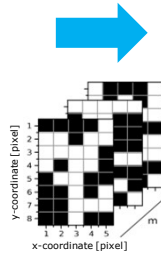
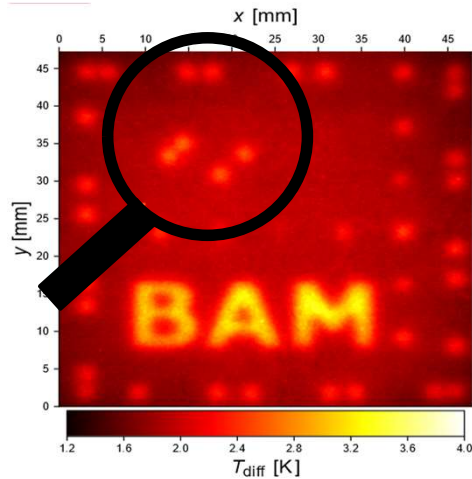
24.05.2022

Thermografische Detektion eingeschlossener Defekte mit Hilfe von 2D-strukturierten Beleuchtungsmustern

10

26

Rekonstruktion: Vergleich mit konventioneller Methodik



Konventionell: flächige Beleuchtung

Photothermische Super-Resolution
Rekonstruktion

Abbildungen reproduziert aus [2]

24.05.2022

Thermografische Detektion eingeschlossener Defekte mit Hilfe von 2D-strukturierten Beleuchtungsmustern

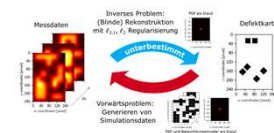
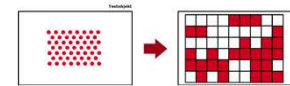
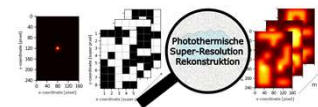
10

27

SR-Rekonstruktion mit 2D-Beleuchtungsmustern Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung:

- SR-Rekonstruktion erlaubt Defekttrennung/-auflösung jenseits des Limits konventioneller Verfahren.
- Messzeitreduzierung durch 2D-Beleuchtungsmuster ca. 8x gegenüber punktförmiger Anregung
- Modell ist umkehrbar -> systematische Untersuchung durch Simulation möglich



Ausblick:

- Weitere Studien zur Parameteroptimierung
- Einsatz von KI-Methodiken zur Verbesserung der Defektformrekonstruktion

24.05.2022

Thermografische Detektion eingeschlossener Defekte mit Hilfe von 2D-strukturierten Beleuchtungsmustern

11

28

Vielen Dank!

Ich freue mich auf
Ihre Fragen!



BAM Department 8.7: Thermografische Verfahren

2D random pattern excitation References

- (1) Burgholzer, P., Berer, T., Ziegler, M., Thiel, E., Ahmadi, S., Gruber, J., Mayr, G., and Hendorfer, G., "Blind structured illumination as excitation for super-resolution photothermal radiometry," *Quantitative InfraRed Thermography Journal* 17(4), 268–278 (2020).
- (2) Lecompagnon, J., Ahmadi, S., Hirsch, P., Rupprecht, C., and Ziegler, M., "Investigations on photothermal super resolution reconstruction using 2D-structured illumination patterns," in [SPIE Future Sensing Technologies 2021], Valenta, C. R., Shaw, J. A., and Kimata, M., eds., 11914, 124–131, International Society for Optics and Photonics, SPIE (Nov. 2021).
- (3) Lecompagnon, J., Ahmadi, S., Hirsch, P., and Ziegler, M., "Full-frame thermographic super-resolution with 2D-structured laser heating," in [Thermosense: Thermal Infrared Applications XLIII], Zalameda, J. N. and Mendioroz, A., eds., 11743, 200–208, International Society for Optics and Photonics, SPIE (Apr. 2021).
- (4) Lecompagnon, J.; Hirsch, P.; Rupprecht, C. & Ziegler, M., "Thermographic testing using 2D pseudo-random illumination and photothermal super resolution reconstruction" in [Thermosense: Thermal Infrared Applications XLIV], Mendioroz, A. & Avdelidis, N. P., eds., International Society for Optics and Photonics, SPIE (Apr. 2022).
- (5) Ahmadi, S., Lecompagnon, J., Hirsch, P. D., Burgholzer, P., Jung, P., Caire, G., and Ziegler, M., "Laser excited super resolution thermal imaging for nondestructive inspection of internal defects," *Scientific Reports* 10 (Dec. 2020).
- (6) Lecompagnon, J., Ahmadi, S., Hirsch, P., Rupprecht, C., and Ziegler, M., "Thermographic detection of internal defects using 2D photothermal super resolution reconstruction with sequential laser heating," submitted to *Journal of Applied Physics*, arxiv:2203.02060 (Mar. 2022).
- (7) Cole, K., Beck, J., Haji-Sheikh, A., and Litkouhi, B., [Heat Conduction Using Greens Functions], CRC Press (July 2010).
- (8) Burgholzer, P., Berer, T., Gruber, J., and Mayr, G., "Super-resolution thermographic imaging using blind structured illumination," *Applied Physics Letters* 111, 031908 (July 2017).
- (9) Haltmeier, M., Berer, T., Moon, S., and Burgholzer, P., "Compressed sensing and sparsity in photoacoustic tomography," *Journal of Optics* 18, 114004 (Oct. 2016).
- (10) Haltmeier, M., Sandbichler, M., Berer, T., Bauer-Marschallinger, J., Burgholzer, P., and Nguyen, L., "A sparsification and reconstruction strategy for compressed sensing photoacoustic tomography," *Acoustical Society of America* 143, 3838–3848 (June 2018).
- (11) Ahmadi, S., Hauffen, J. C., Kästner, L., Jung, P., Caire, G., and Ziegler, M., "Learned Block Iterative Shrinkage Thresholding Algorithm for Photothermal Super Resolution Imaging," arxiv:2012.03547 (Dec. 2020).
- (12) Boyd, S., "Distributed Optimization and Statistical Learning via the Alternating Direction Method of Multipliers," *Foundations and Trends® in Machine Learning* 3(1), 1–122 (2010).