

Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer Super-Resolution- Rekonstruktion und 2D-Beleuchtungsmustern

Julien LECOMPAGNON¹, Philipp Daniel HIRSCH¹, Christian RUPPRECHT²,
Mathias ZIEGLER¹

¹ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

² Technische Universität Berlin, FG Beschichtungstechnik, 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 Einschränkung für ein- und zweidimensionale Defektgeometrien überwunden werden kann, indem das Prüfobjekt mit einzelnen Laserspots sequenziell strukturiert beleuchtet wird und damit anschließend aus den resultierenden Messdaten durch Anwendung photothermischer Super-Resolution-Rekonstruktion eine Defektkarte berechnet werden kann, welche eine deutlich verbesserte Trennung einzelner naheliegender Defekte erlaubt. Dieses Verfahren profitiert dabei im Ergebnis stark von der Kombination von sequenzieller räumlich strukturierter Beleuchtung und modernen numerischen Optimierungsverfahren, was jedoch in Summe stark auf Kosten der experimentellen Komplexität geht. Dies führt im Gegensatz zur Anwendung von etablierten thermografischen Standardverfahren mit vollflächiger Beleuchtung zu langen Messzeiten, großen Datensätzen und langwieriger numerischer Auswertung.

In dieser Arbeit berichten wir über die Anwendung vollflächig räumlich-strukturierter zweidimensionaler Beleuchtungsmuster, welche es durch den Einsatz modernster Laserprojektortechnik in Verbindung mit einem Hochleistungslaser überhaupt erst erlaubt, eine effiziente Umsetzung von photothermischer Super-Resolution-Rekonstruktion auch für größere Prüfflächen zu erreichen.



29.09.2022

Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer Super-Resolution-Rekonstruktion und 2D-Beleuchtungsmustern

Julien Lecompaon¹, Philipp Daniel Hirsch¹, Christian Rupprecht²
und Mathias Ziegler¹

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

2) Technische Universität Berlin, FG Beschichtungstechnik, 10623 Berlin

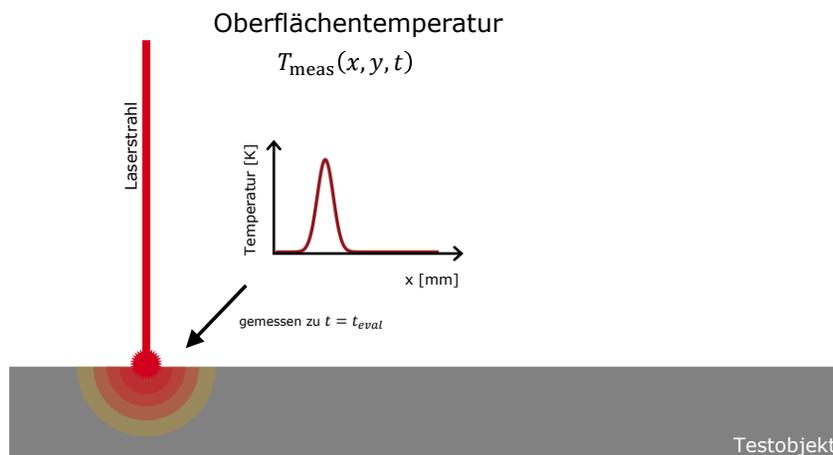
www.bam.de

1

Motivation Photothermische SR-Rekonstruktion

Modell

Praxis



29.09.2022

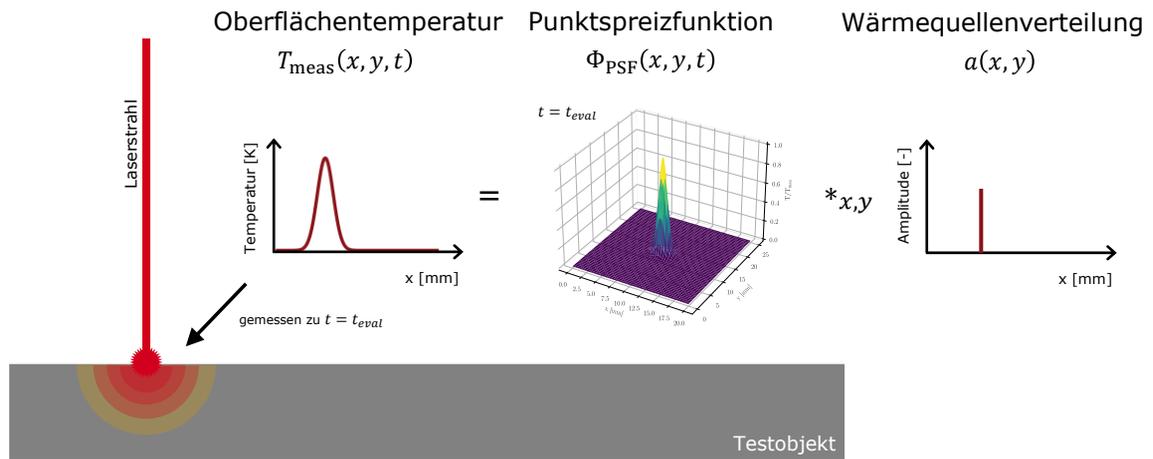
Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

2

Motivation Photothermische SR-Rekonstruktion



Modell Praxis



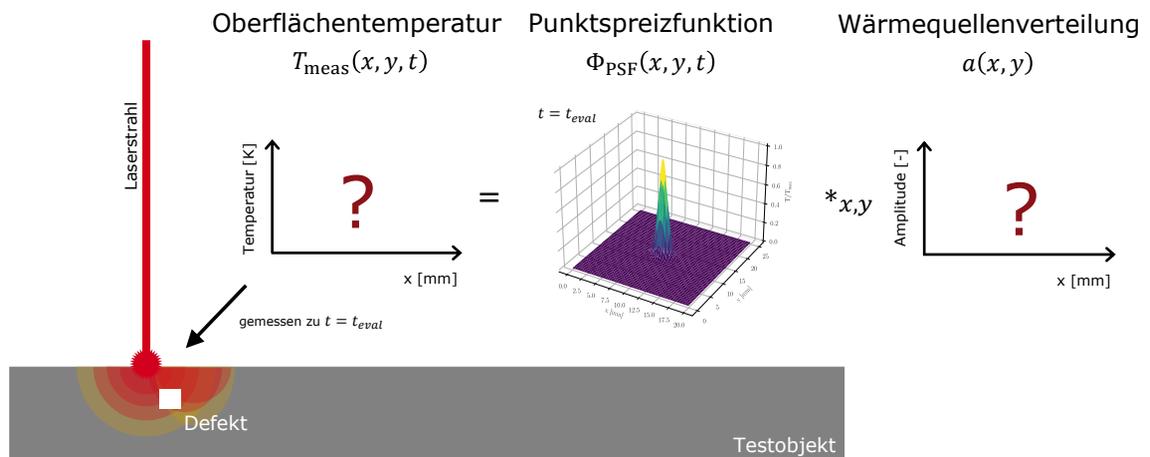
29.09.2022 Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

3

Motivation Photothermische SR-Rekonstruktion



Modell Praxis



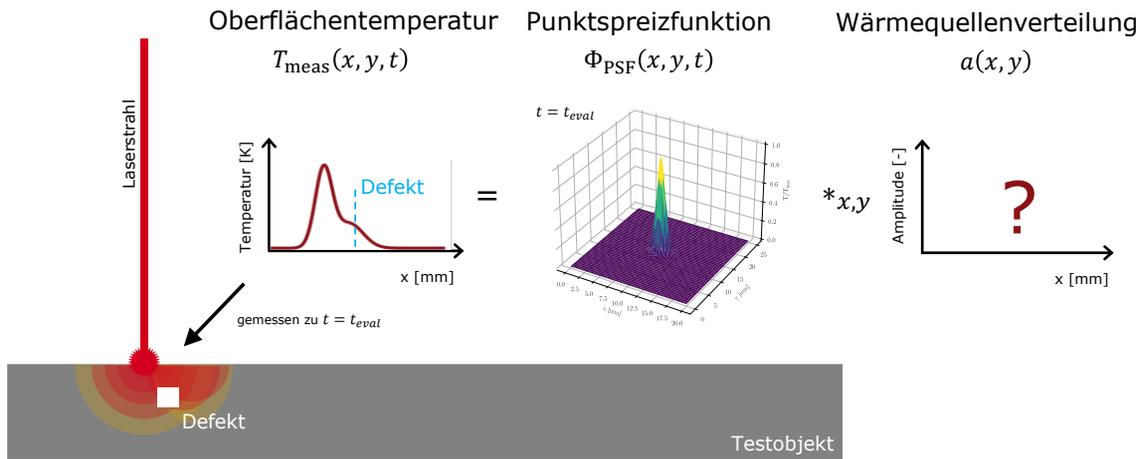
29.09.2022 Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

4

Motivation Photothermische SR-Rekonstruktion



Modell Praxis



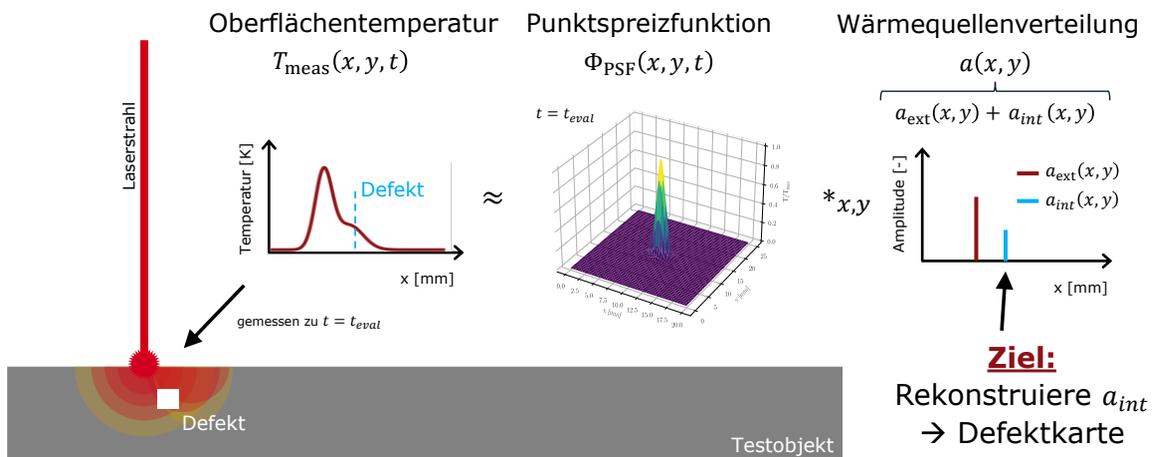
29.09.2022 Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

5

Motivation Photothermische SR-Rekonstruktion



Modell Praxis



29.09.2022 Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

6

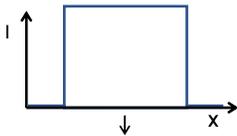
Motivation Photothermische SR-Rekonstruktion



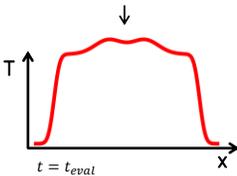
Modell

Praxis

Flächige Anregung



Auswertung



29.09.2022

Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

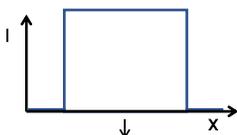
Motivation Photothermische SR-Rekonstruktion



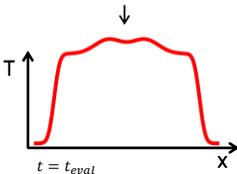
Modell

Praxis

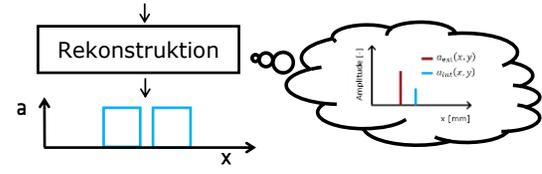
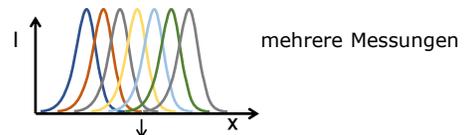
Flächige Anregung



Auswertung



Strukturierte Anregung

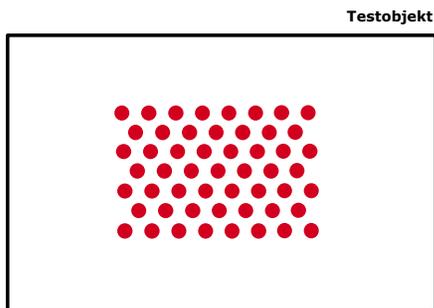


29.09.2022

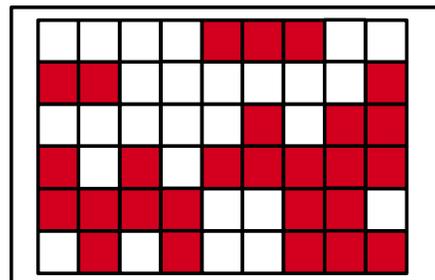
Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

Flächig strukturierte Beleuchtung Messstrategien

Punktweiser Scan:



Projektion von 2D-Mustern:



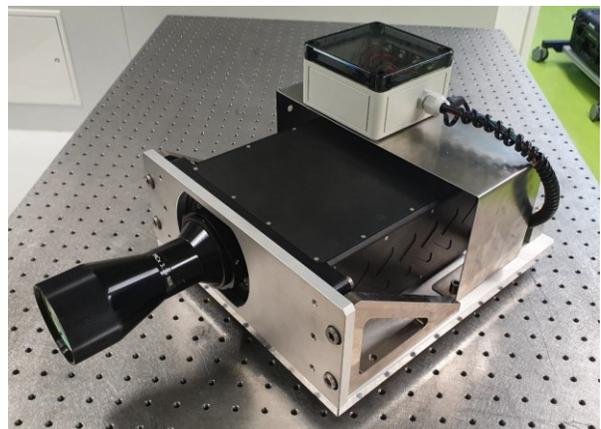
Siehe auch: Lecompanion, J et al., "Thermographic detection of internal defects using 2D photothermal super resolution reconstruction with sequential laser heating", Journal of Applied Physics, AIP Publishing, 2022, 131

29.09.2022

Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

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 Eingangsleistung (!)
- Objektive auswechselbar



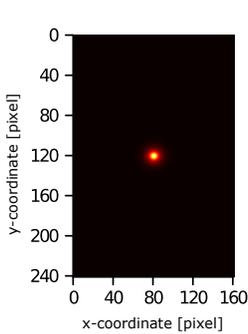
29.09.2022

Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

Photothermische Super-Resolution Rekonstruktion Visualisierung

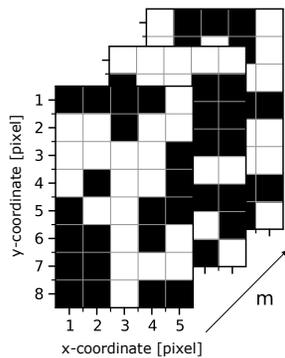
Wärmeausbreitung
(vorab ermittelbar)

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



Anregung
(vom Anwender bestimmt)

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

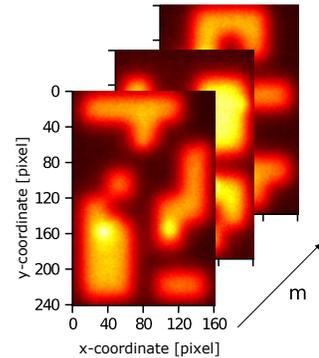


Defektkarte
(gesucht)



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

Messdaten
(zu ermitteln)



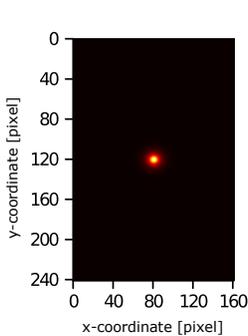
29.09.2022

Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

Photothermische Super-Resolution Rekonstruktion Visualisierung

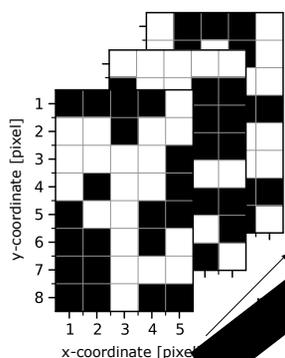
Wärmeausbreitung
(vorab ermittelbar)

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

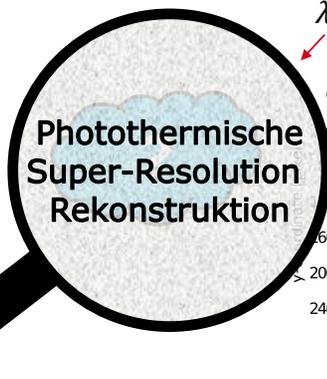


Anregung
(vom Anwender bestimmt)

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

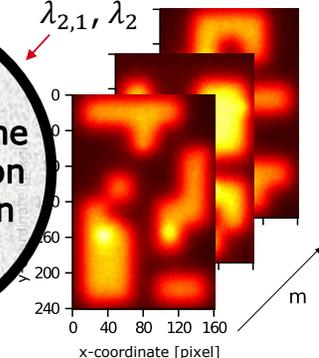


Defektkarte
(gesucht)



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

Messdaten
(zu ermitteln)



29.09.2022

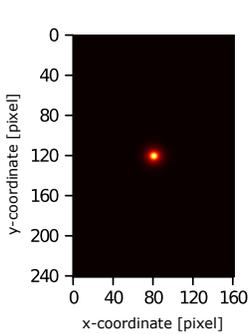
Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

Photothermische Super-Resolution Rekonstruktion

Visualisierung

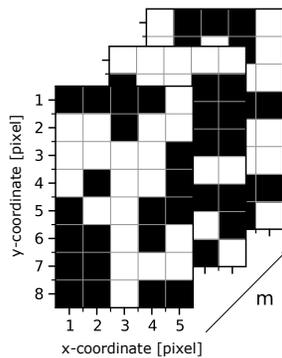
Wärmeausbreitung
(vorab ermittelbar)

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

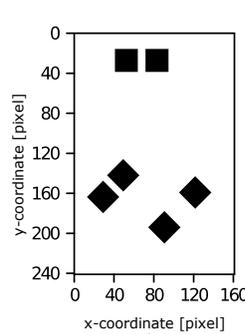


Anregung
(vom Anwender bestimmt)

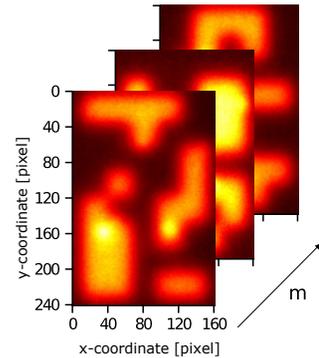
$$*_{x,y} (a_{\text{ext}}^m(x, y) + a_{\text{int}}(x, y))$$



Defektkarte
(gesucht)



Messdaten
(zu ermitteln)



Kein Hintergrundsignal!

29.09.2022

Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

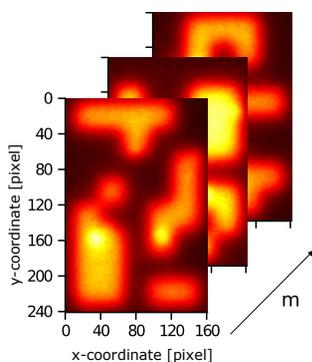
13

Defektrekonstruktion

Inverses Problem und Vorwärtzlösung

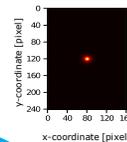


Messdaten



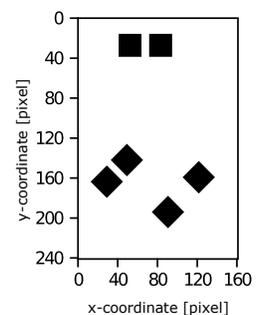
Inverses Problem:
(Blinde) Rekonstruktion
mit $\ell_{2,1}$, ℓ_2 Regularisierung

PSF als Input



unterbestimmt

Defektkarte



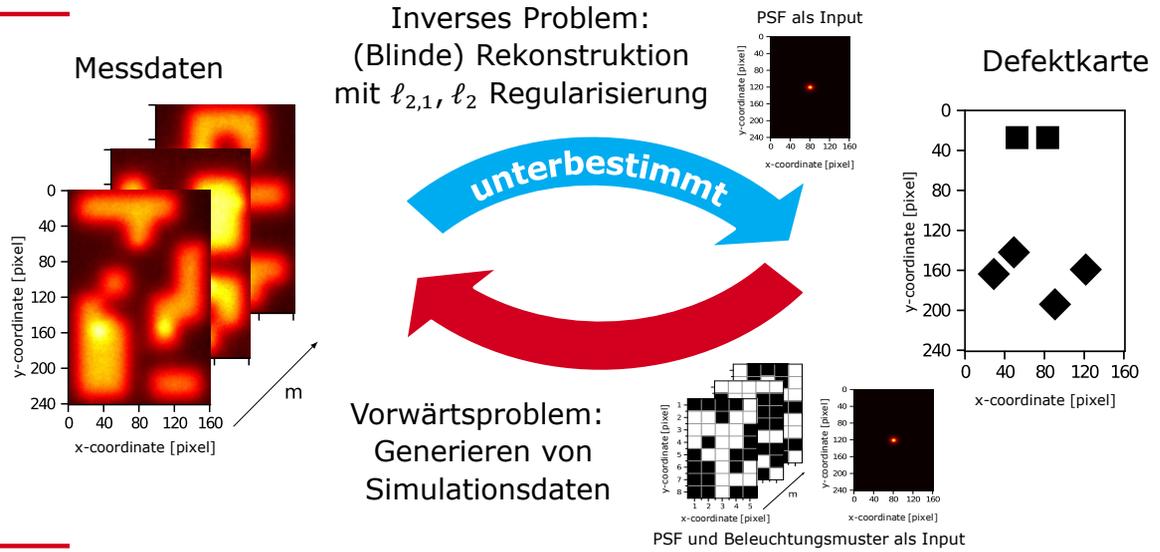
29.09.2022

Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

14

Defektrekonstruktion

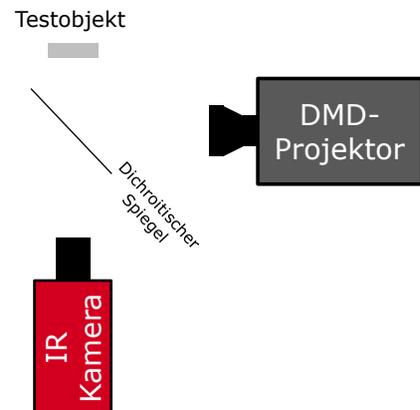
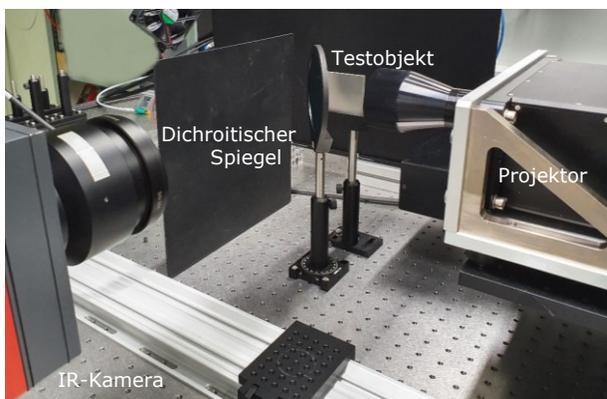
Inverses Problem und Vorwärtslösung



29.09.2022 Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

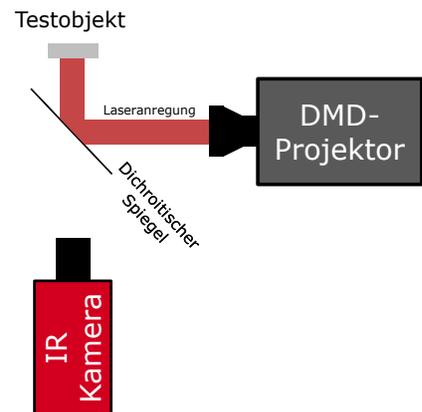
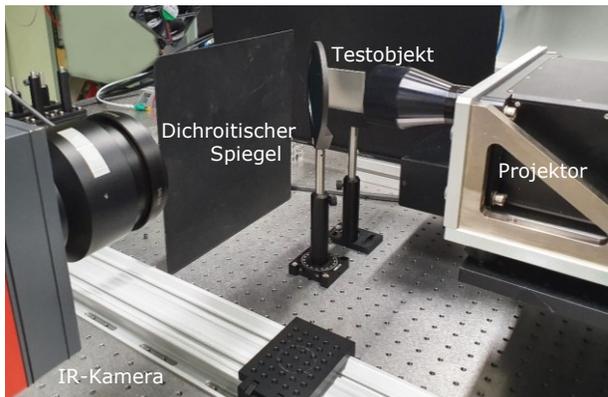
Methodenverifikation

Equipment und Testaufbau



29.09.2022 Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

Methodenverifikation Equipment und Testaufbau

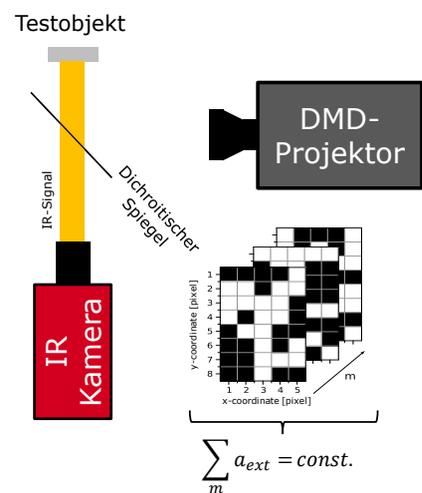
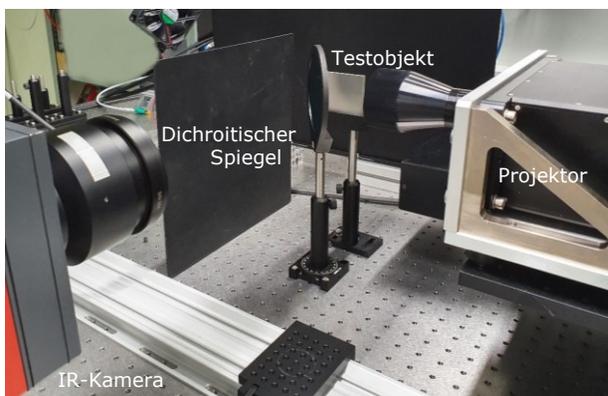


29.09.2022

Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

17

Methodenverifikation Equipment und Testaufbau

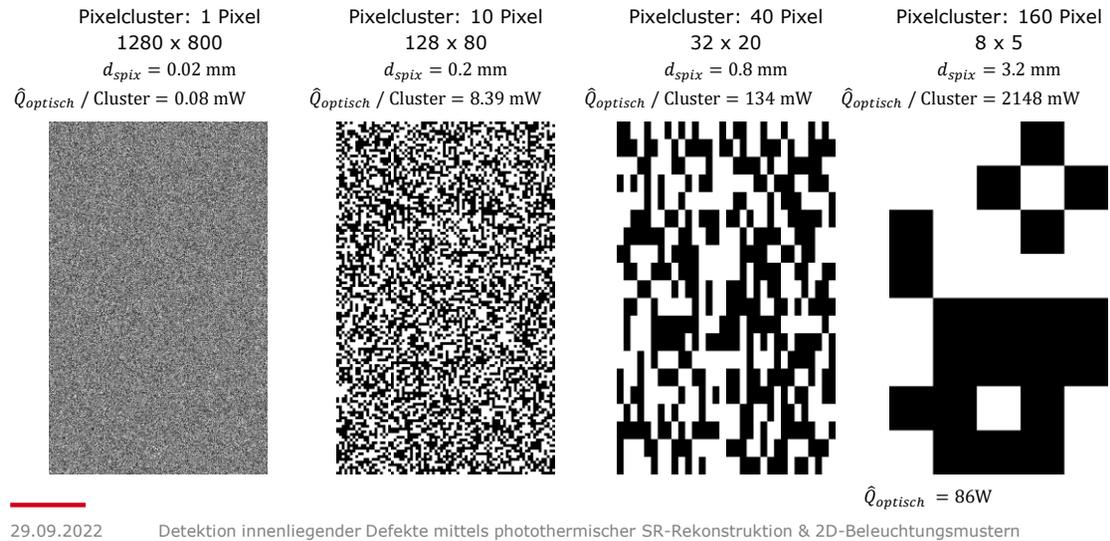


29.09.2022

Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

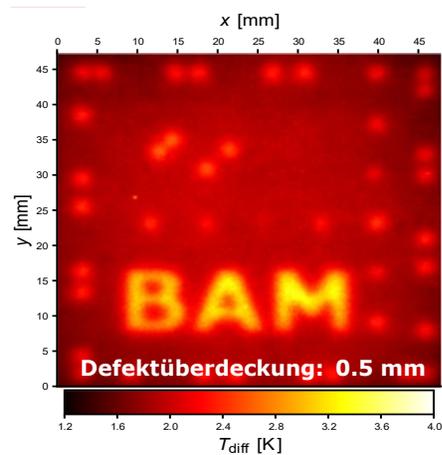
18

Vollflächig strukturierte Beleuchtung: Zufallsmuster mit Pixelclustern



19

Rekonstruktion: Vergleich mit konventioneller Methodik



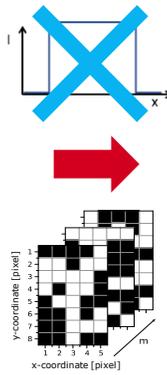
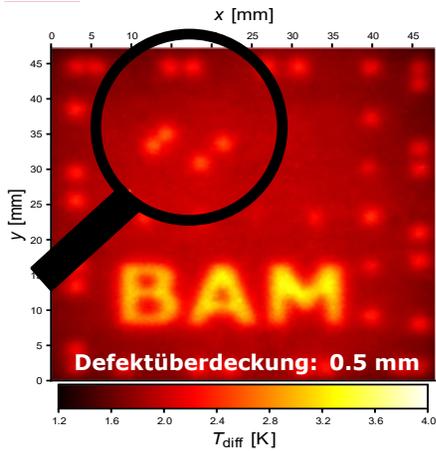
Konventionell: flächige Beleuchtung

Abbildungen reproduziert aus [2]

29.09.2022 Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

20

Rekonstruktion: Vergleich mit konventioneller Methodik



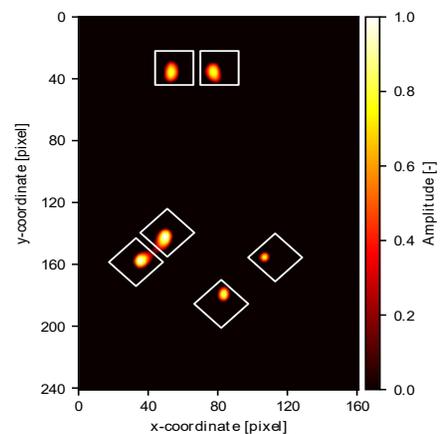
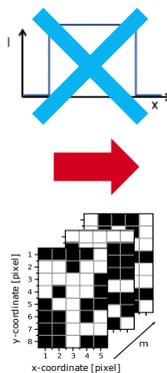
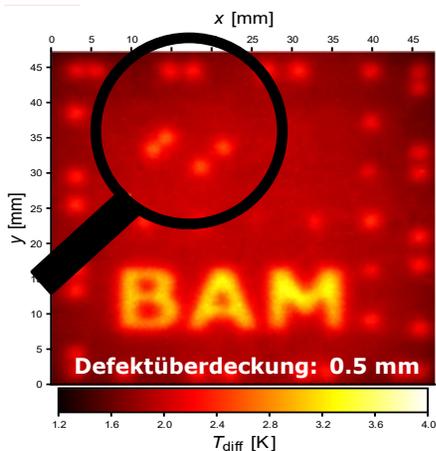
Konventionell: flächige Beleuchtung

Abbildungen reproduziert aus [2]

29.09.2022

Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

Rekonstruktion: Vergleich mit konventioneller Methodik



Konventionell: flächige Beleuchtung

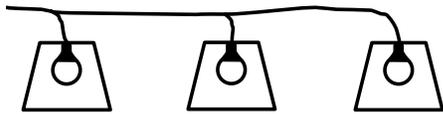
Photothermische Super-Resolution
Rekonstruktion

Abbildungen reproduziert aus [2]

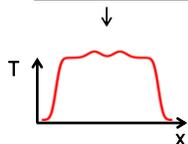
29.09.2022

Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

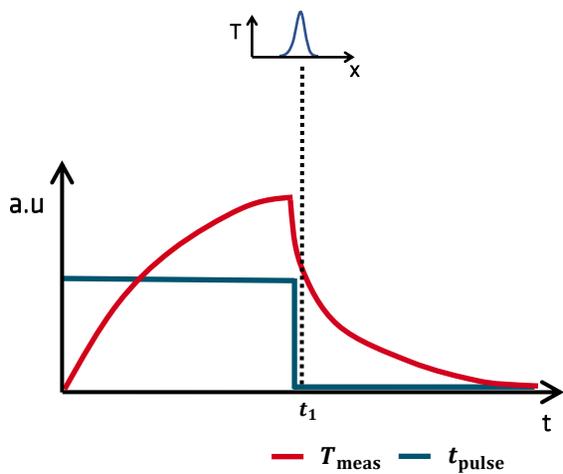
Auflösung innerer Defekte Grenzen für tiefliegende Defekte



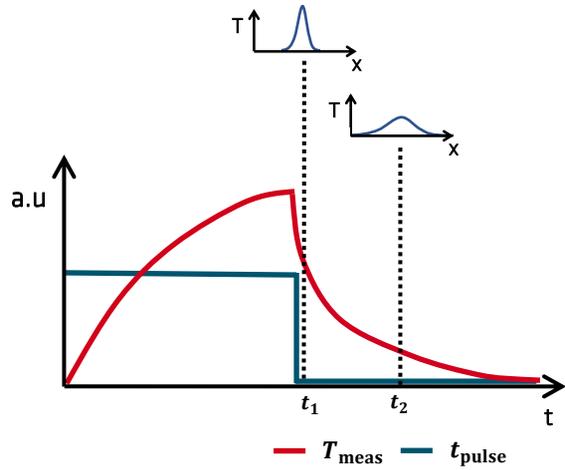
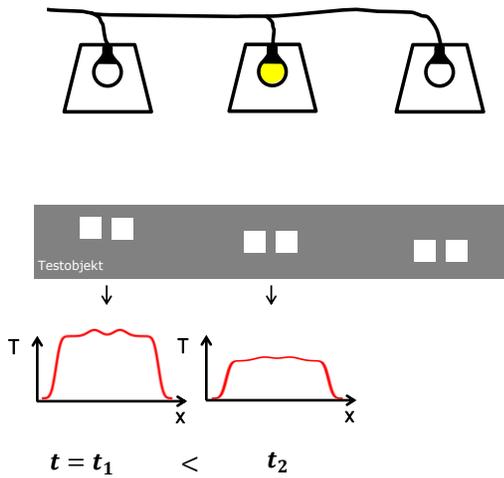
Auflösung innerer Defekte Grenzen für tiefliegende Defekte



$t = t_1$



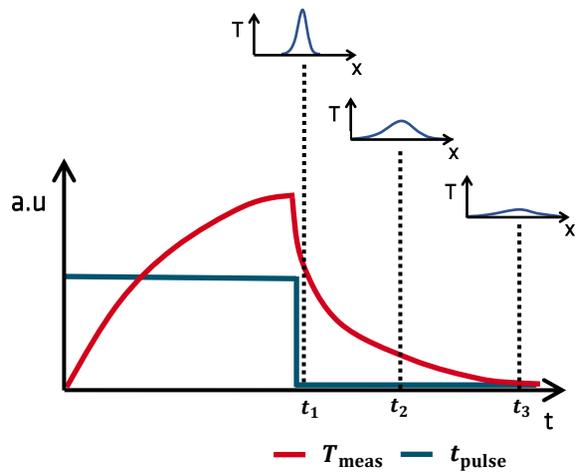
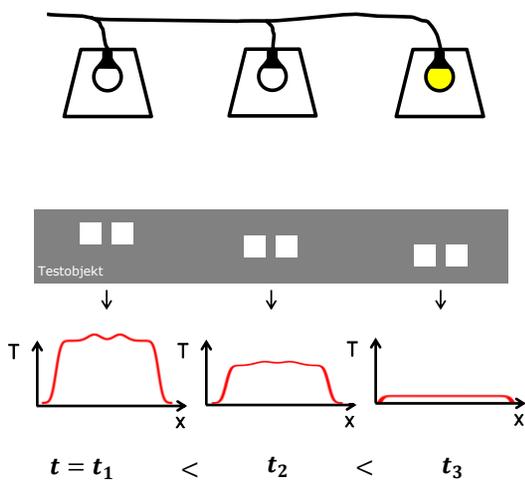
Auflösung innerer Defekte Grenzen für tiefliegende Defekte



29.09.2022

Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

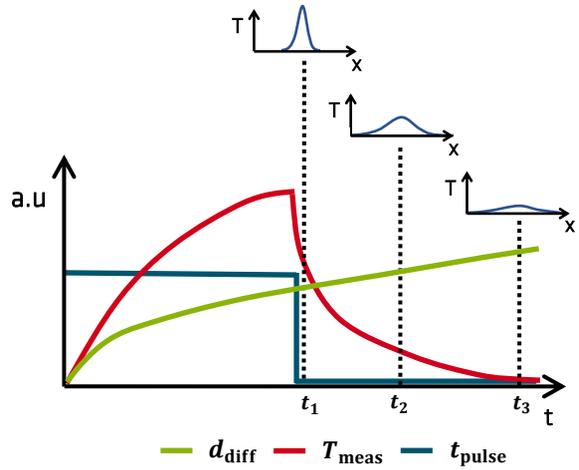
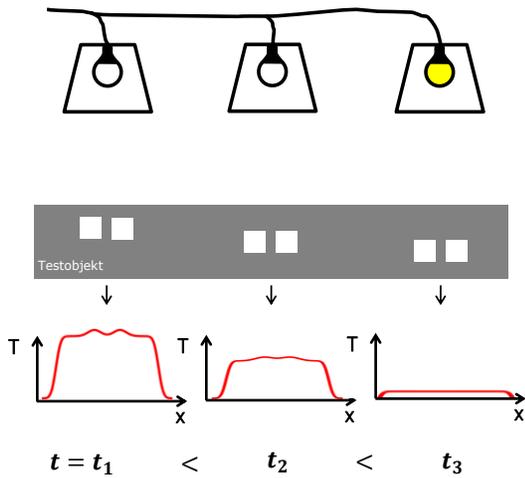
Auflösung innerer Defekte Grenzen für tiefliegende Defekte



29.09.2022

Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

Auflösung innerer Defekte Grenzen für tiefliegende Defekte

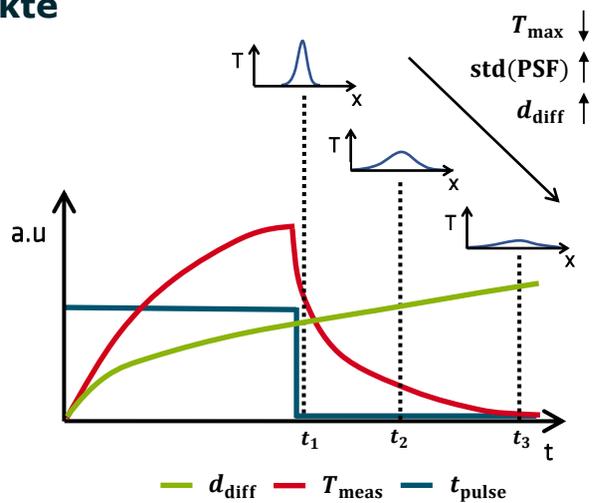
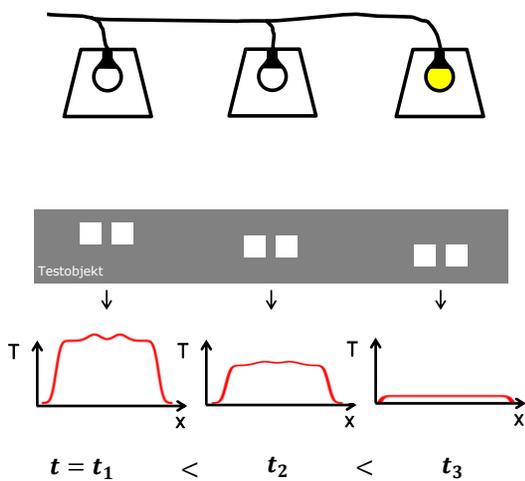


29.09.2022

Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

27

Auflösung innerer Defekte Grenzen für tiefliegende Defekte



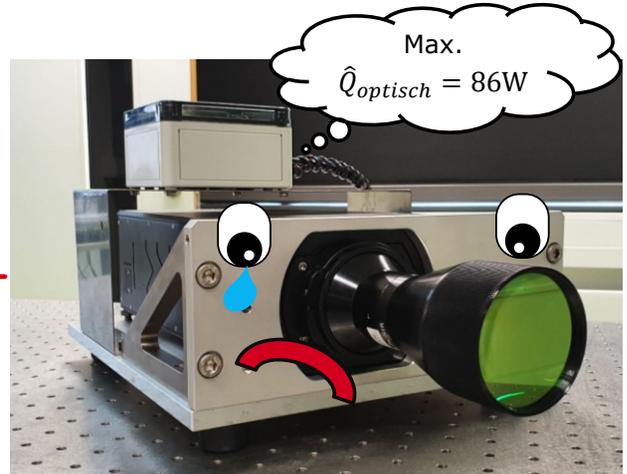
29.09.2022

Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

28

Auflösung innerer Defekte Grenzen für tiefliegende Defekte

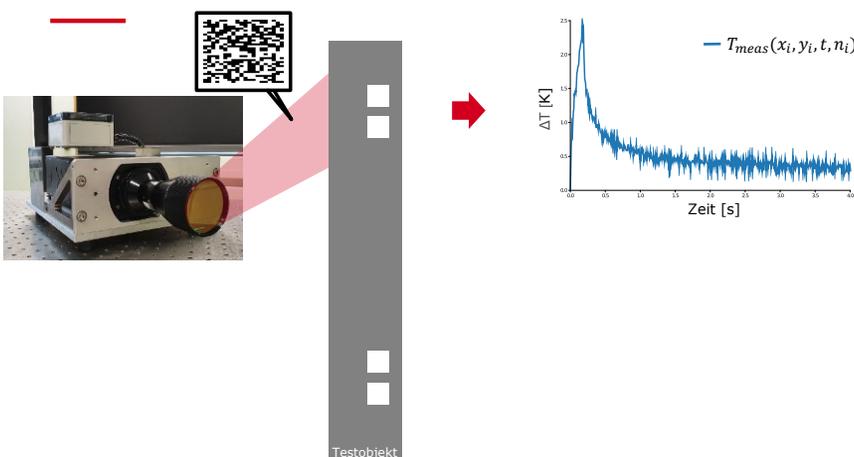
- ⚡ SNR von Bestrahlungsstärke abhängig
- ⚡ Eindringtiefe steigt mit der Beleuchtungsdauer
- ⚡ Breite der PSF von Beleuchtungsdauer abhängig
- + Weitere Einflussgrößen
- + Füllfaktor Beleuchtung
- + Absorptions- bzw. Emissionsgrad
- + Diffusivität Material



29.09.2022

Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

Auflösung innerer Defekte Strukturiert Limits durchbrechen

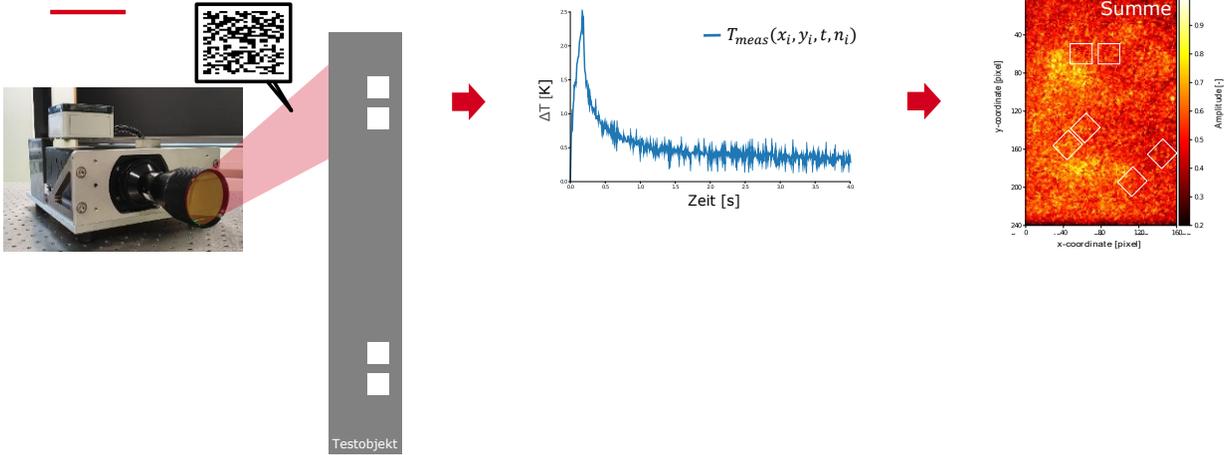


Defektüberdeckung: 1 mm

29.09.2022

Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

Auflösung innerer Defekte Strukturiert Limits durchbrechen

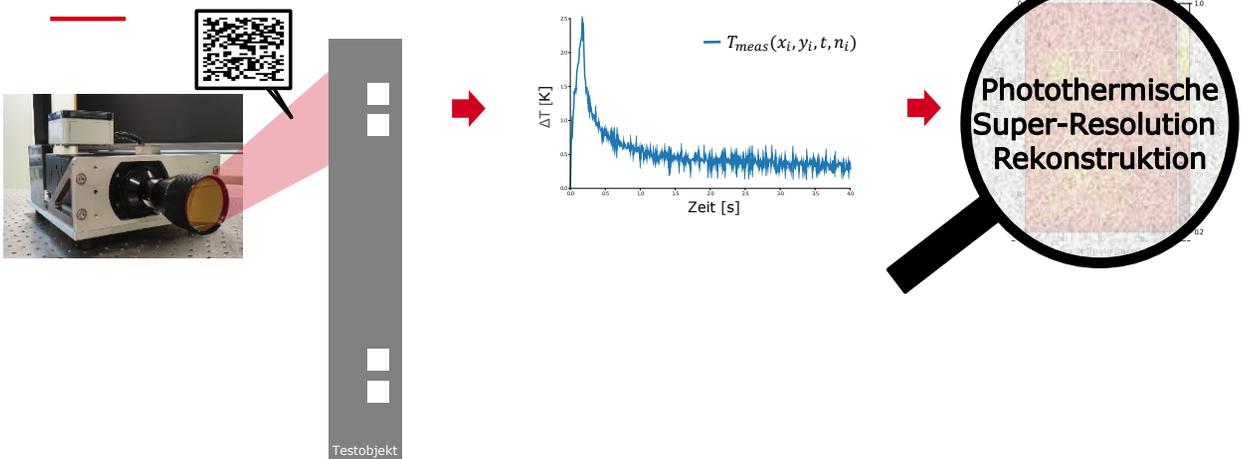


Defektüberdeckung: 1 mm

29.09.2022

Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

Auflösung innerer Defekte Strukturiert Limits durchbrechen

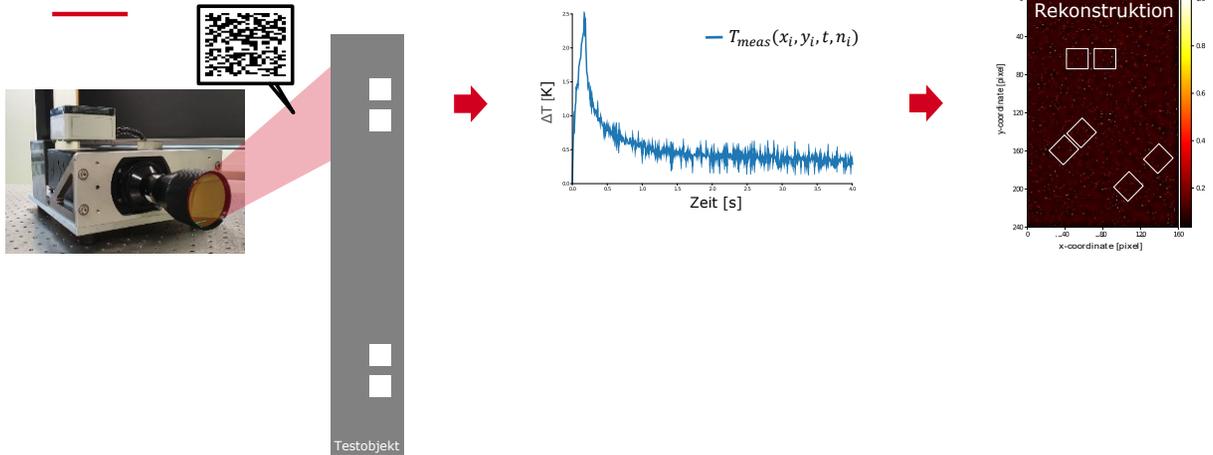


Defektüberdeckung: 1 mm

29.09.2022

Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

Auflösung innerer Defekte Strukturiert Limits durchbrechen



Defektüberdeckung: 1 mm

29.09.2022

Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

33

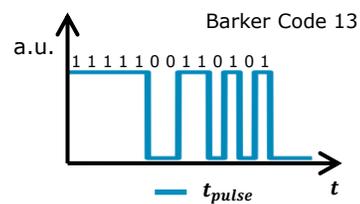
Super-Resolution Rekonstruktion Strukturiert Limits durchbrechen



Räumliche Strukturierung:
(Verbesserung Auflösungsvermögen)



Zeitliche Strukturierung:
(Verbesserung Tiefenreichweite)



29.09.2022

Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

34

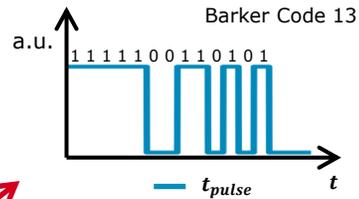
Super-Resolution Rekonstruktion Strukturiert Limits durchbrechen



Räumliche Strukturierung:
(Verbesserung Auflösungsvermögen)



Zeitliche Strukturierung:
(Verbesserung Tiefenreichweite)



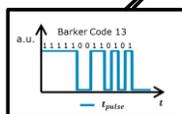
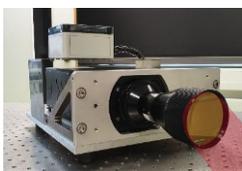
Pulskompression:

1. Anregung mit n-bit Pulsfolge
 2. Signalextraktion durch Korrelation mit Anregung
- Ergebnis: Temperatursignal ähnelt 1-bit Anregung mit höherer Leistung

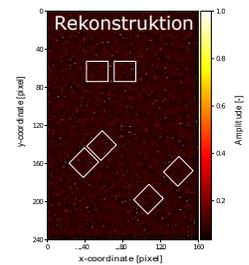
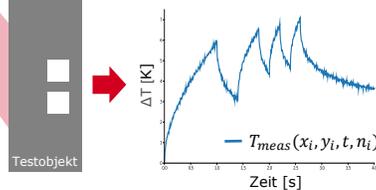
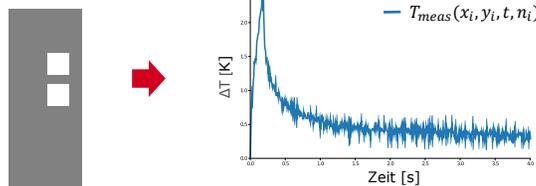
29.09.2022

Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

Auflösung innerer Defekte Strukturiert Limits durchbrechen



1 bit \cong 200 ms

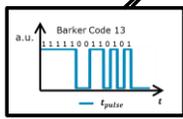
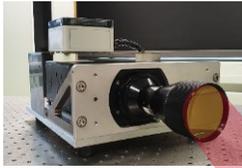


Defektüberdeckung: 1 mm

29.09.2022

Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

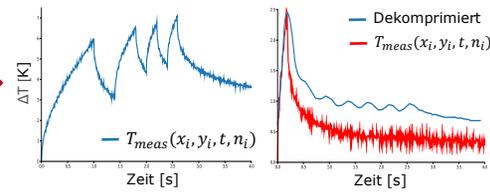
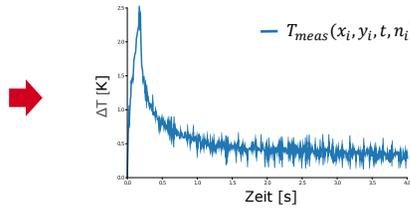
Auflösung innerer Defekte Strukturiert Limits durchbrechen



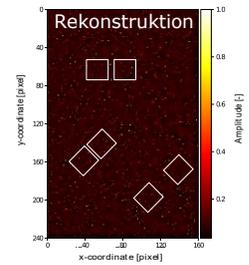
1 bit $\hat{=}$ 200 ms



Testobjekt



Dekomprimierung

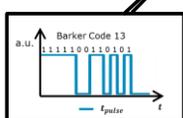
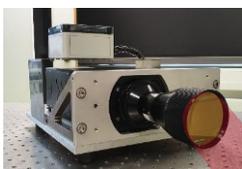


Defektüberdeckung: 1 mm

29.09.2022

Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

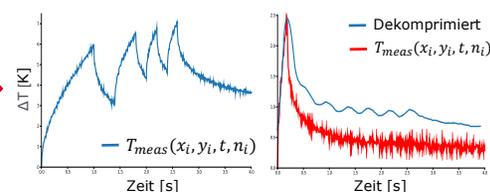
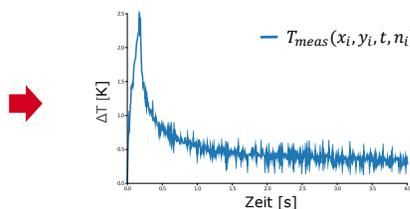
Auflösung innerer Defekte Strukturiert Limits durchbrechen



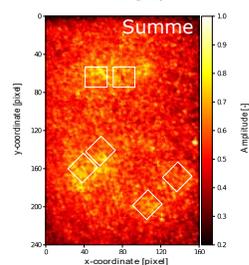
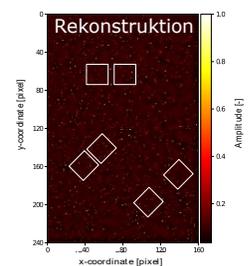
1 bit $\hat{=}$ 200 ms



Testobjekt



Dekomprimierung

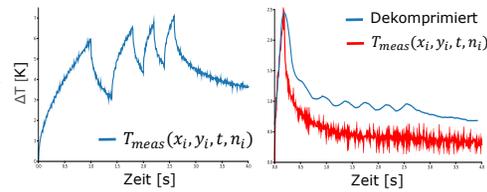
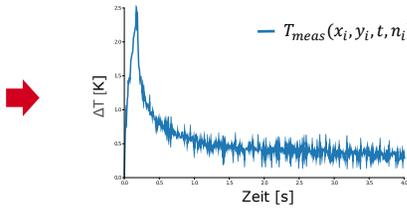
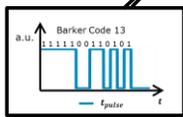
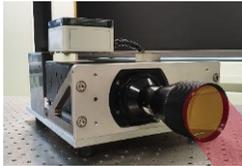


Defektüberdeckung: 1 mm

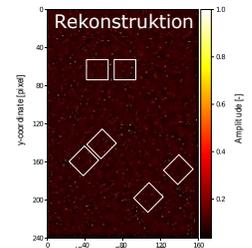
29.09.2022

Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

Auflösung innerer Defekte Strukturiert Limits durchbrechen



Dekomprimierung



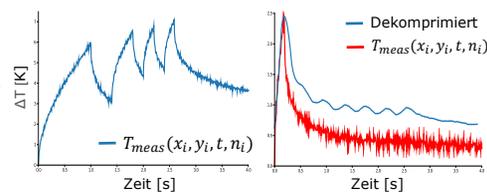
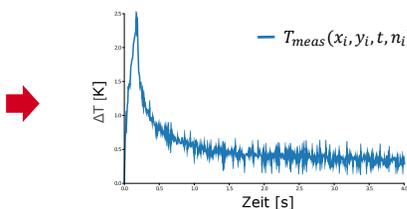
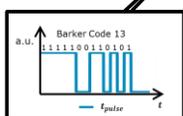
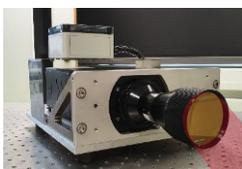
**Photothermische
Super-Resolution
Rekonstruktion**

Defektüberdeckung: 1 mm

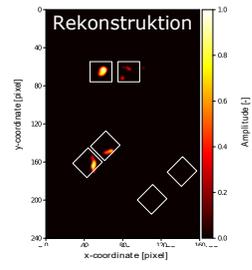
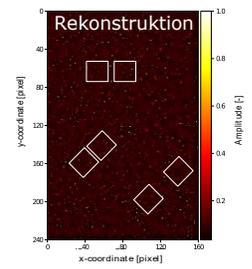
29.09.2022

Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

Auflösung innerer Defekte Strukturiert Limits durchbrechen



Dekomprimierung



Defektüberdeckung: 1 mm

29.09.2022

Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

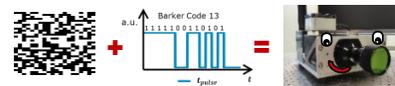
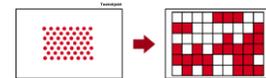
SR-Rekonstruktion mit 2D-Beleuchtungsmustern

Zusammenfassung und Ausblick



Zusammenfassung:

- SR-Rekonstruktion erlaubt Defekttrennung/-auflösung jenseits des klassischer Limits.
- Messzeitreduzierung durch 2D-Beleuchtungsmuster ca. 8x gegenüber punktförmiger Anregung
- Räumliche und zeitliche Strukturierung der Anregung erlaubt SR trotz Hardwarelimitation



Ausblick:

- Weitere Untersuchungen zu vollstrukturierter Anregung
- Einsatz von KI-Methodiken zur Verbesserung der Defektformrekonstruktion

29.09.2022

Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

41

Vielen Dank
Ich freue mich auf Ihre Fragen!



Julien Lecompaon
julien.lecompaon@bam.de

In Kontakt bleiben



BAM Fachbereich 8.7: Thermografische Verfahren

29.09.2022

Detektion innenliegender Defekte mittels photothermischer SR-Rekonstruktion & 2D-Beleuchtungsmustern

42

Photothermische SR-Rekonstruktion Quellen



- (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) Lecomagnon, 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) Lecomagnon, 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) Lecomagnon, 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., Lecomagnon, 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) Lecomagnon, J.; Ahmadi, S.; Hirsch, P.; Rupprecht, C. & Ziegler, M., "Thermographic detection of internal defects using 2D photothermal super resolution reconstruction with sequential laser heating", *Journal of Applied Physics*, AIP Publishing, 2022, 131
- (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).