
Aktive Wärmefluss-Thermographie als zerstörungsfreies Prüfverfahren für den industriellen Einsatz

Dr.-Ing. Jochen Aderhold

Fraunhofer Wilhelm-Klauditz-Institut

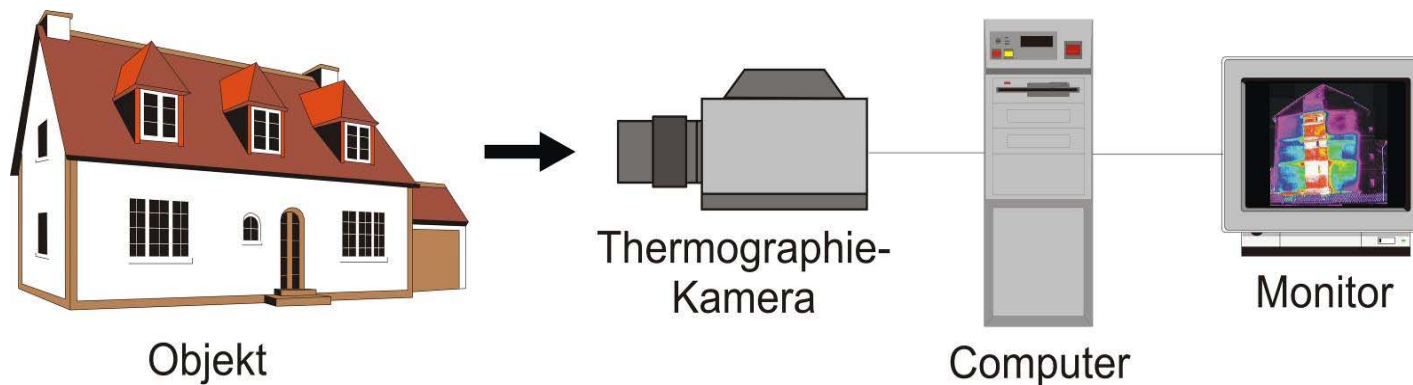
Braunschweig

Aktive Wärmefluss-Thermographie als zerstörungsfreies Prüfverfahren für den industriellen Einsatz

- Physikalische Grundlagen der Infrarot-Thermographie
- Prinzip der Wärmefluss-Thermographie
- Praxisbeispiele
- Zusammenfassung

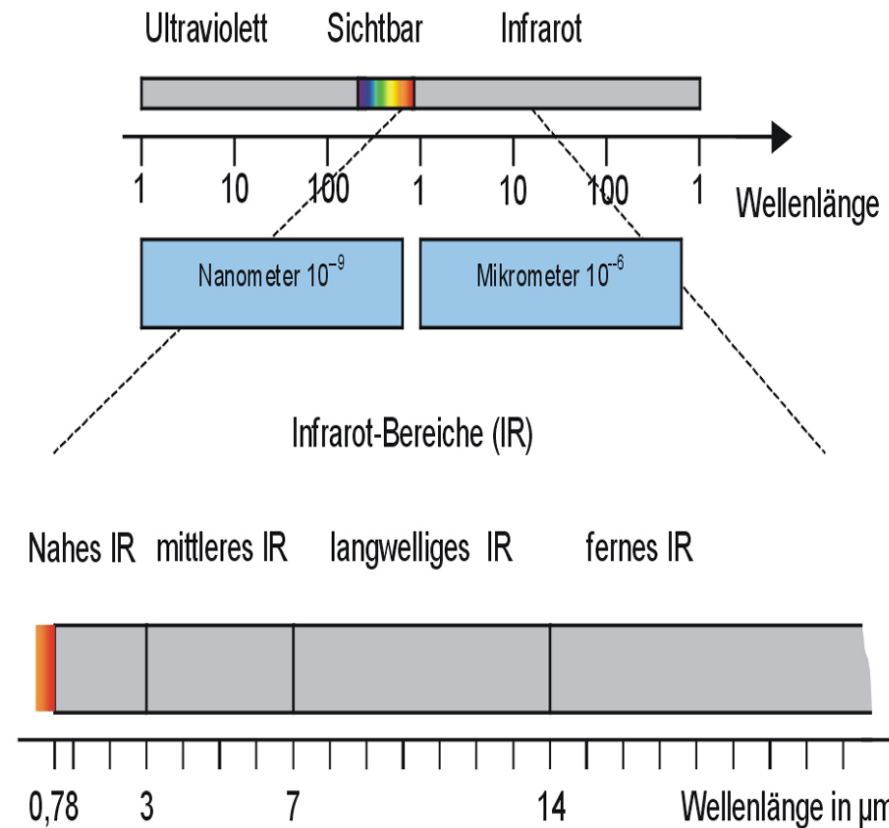
Physikalische Grundlagen der Infrarot-Thermographie (1)

- Prinzip der Thermographie



Physikalische Grundlagen der Infrarot-Thermographie (2)

■ Infraroter Spektralbereich



Physikalische Grundlagen der Infrarot-Thermographie (3)

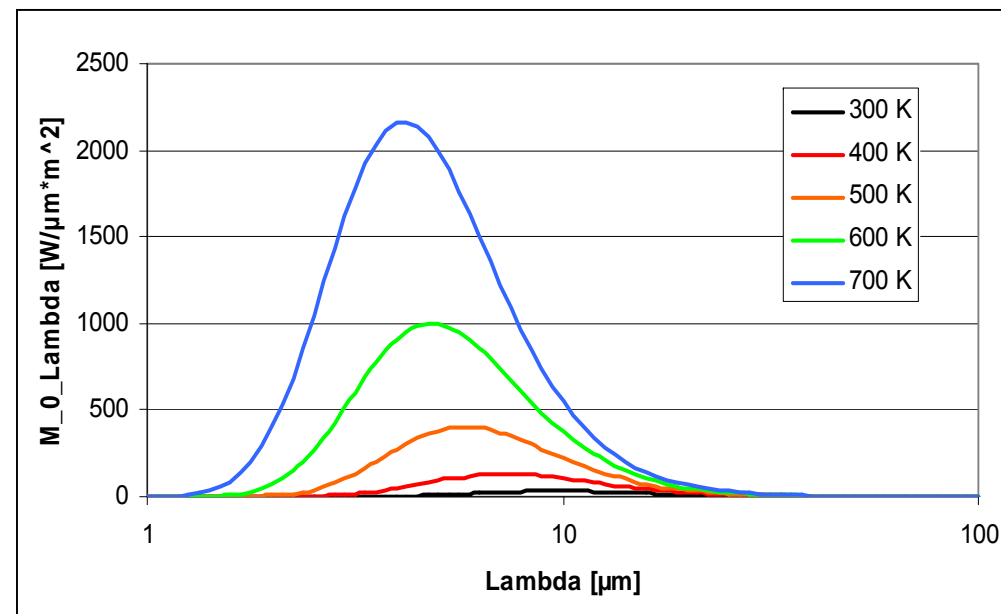
■ Planck'sche Formel

$$M_{\lambda}^0 = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp(C_2 / \lambda T) - 1}$$

■ M_{λ}^0 : Strahlungsleistung eines schwarzen Strahlers pro Fläche und Wellenlängenintervall

$$C_1 = 2\pi^5 h c^2 = 3,742 \cdot 10^{-16} \text{ Wm}^2$$

$$C_2 = hc/k_B = 0,014388 \text{ mK}$$



Physikalische Grundlagen der Infrarot-Thermographie (4)

- Realer Strahler:
 - Strahlt weniger Leistung aus als idealer (schwarzer) Strahler

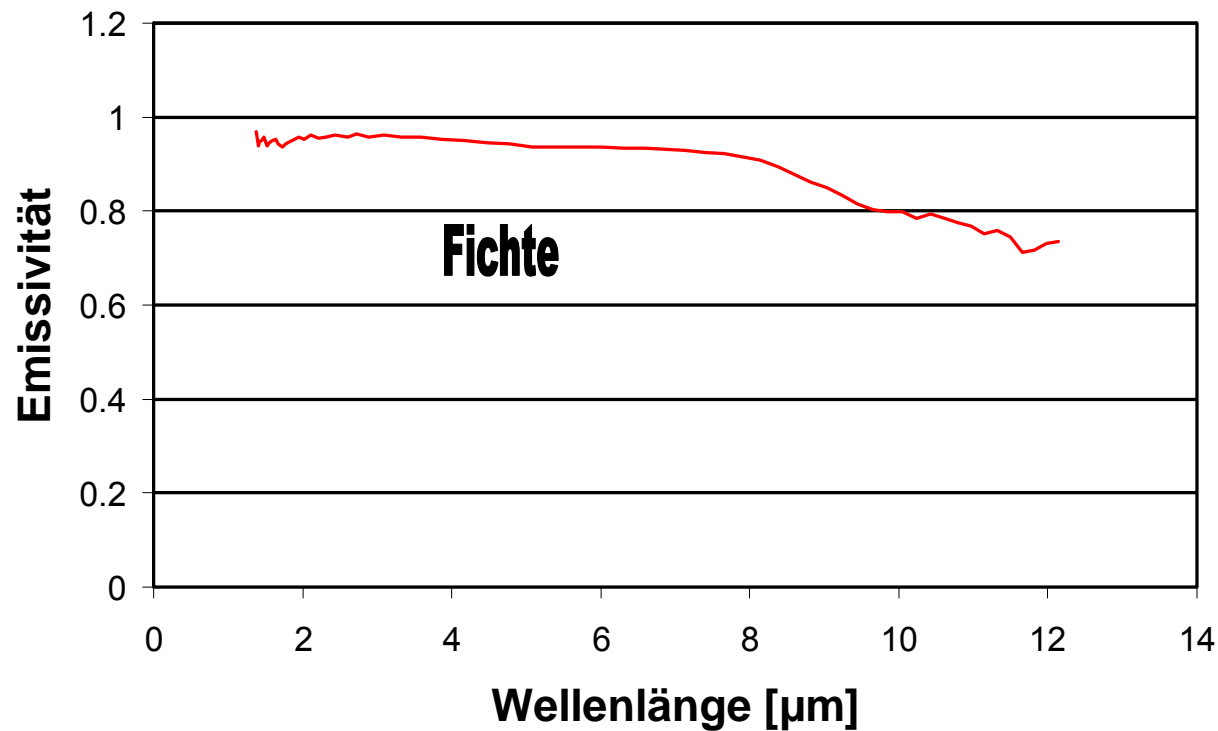
- Emissivität: $M^\varepsilon_\lambda = \varepsilon(\lambda) M^0_\lambda$

- $0 \leq \varepsilon \leq 1$

	Temperature [°C]	ε
Polished Aluminium	0	0.03
Polished Aluminium	100	0.05
Anodized Aluminium	100	0.55
Polished Gold	100	0.02
Polished Iron	40	0.21
Oxidized Iron	100	0.64
Polished Steel	100	0.07
Oxidized Steel (800 °C)	100	0.79
Black Paint	20	0.95
White Paper	20	0.93
Wood	20	0.90
Polished Glass	20	0.94
Human Skin	32	0.98
Water	1	0.92
Snow	0	0.80

Physikalische Grundlagen der Infrarot-Thermographie (5)

- Emissivität messen: Spektroskopie (Reflektion R, ggf. Transmission T)



Physikalische Grundlagen der Infrarot-Thermographie (6)

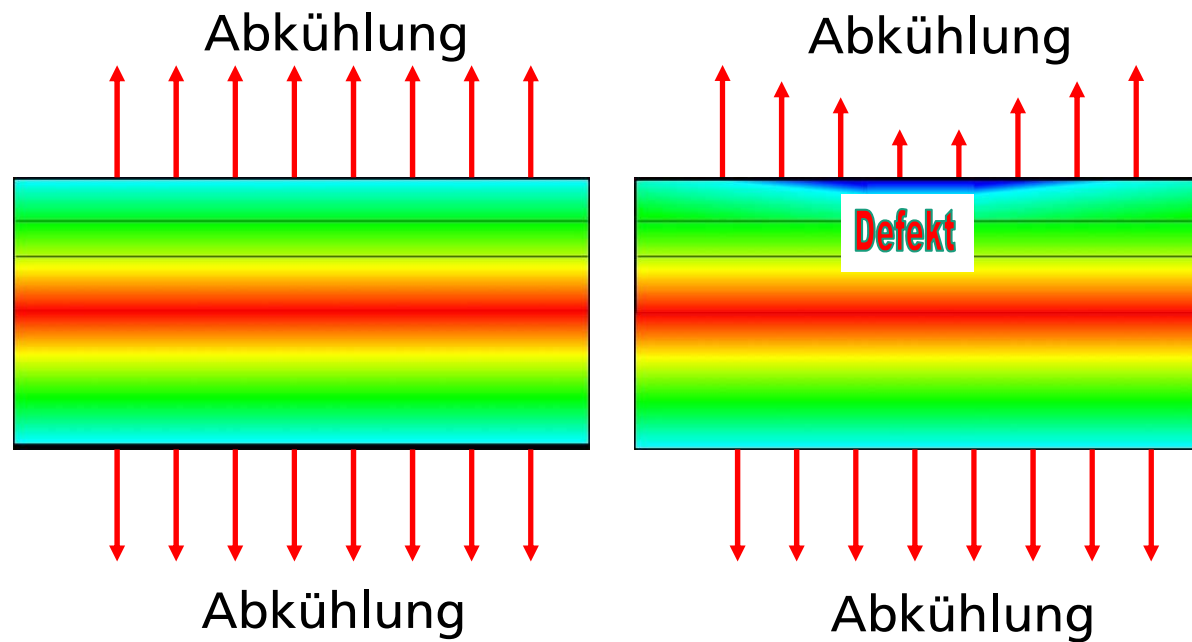
■ $\varepsilon = \frac{(1-R)(1-T)}{1-RT}$ $\varepsilon = (1-R)$ ($T = 0$)

■ Dielektrika: $\varepsilon(\lambda) = \frac{4 n(\lambda)}{(n(\lambda)+1)^2}$ (n: Brechungsindex)

■ Polierte Metalle: $\varepsilon = \frac{0,365}{\sqrt{\Omega}} \sqrt{\frac{\rho}{\lambda}}$ (ρ : spezifischer Widerstand)

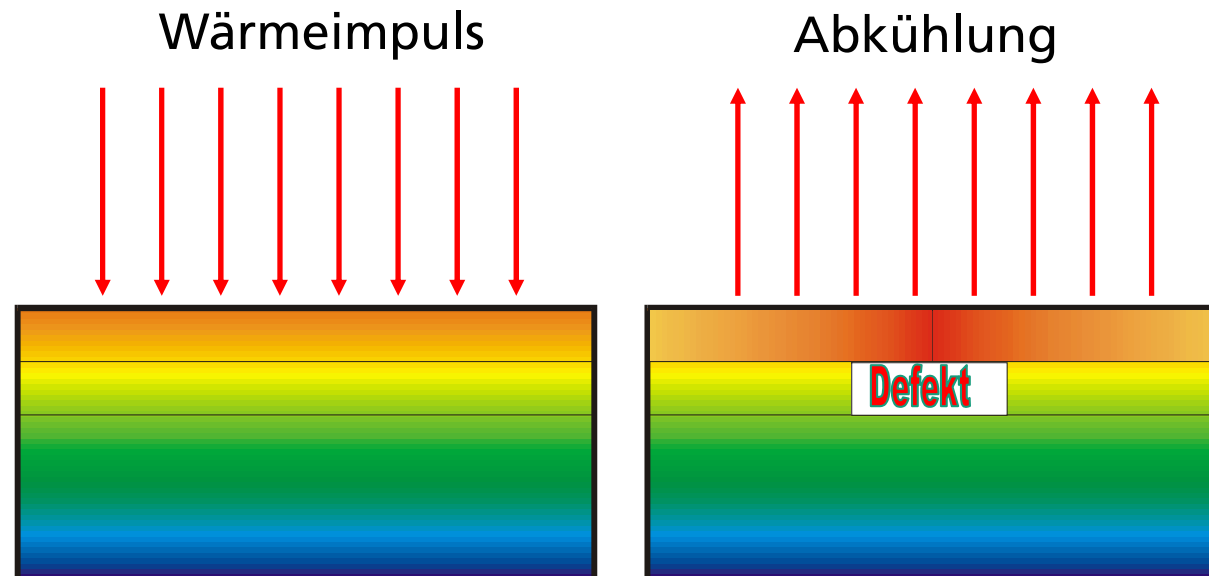
Prinzip der Wärmefluss-Thermographie (1)

■ Passive Wärmefluss-Thermographie



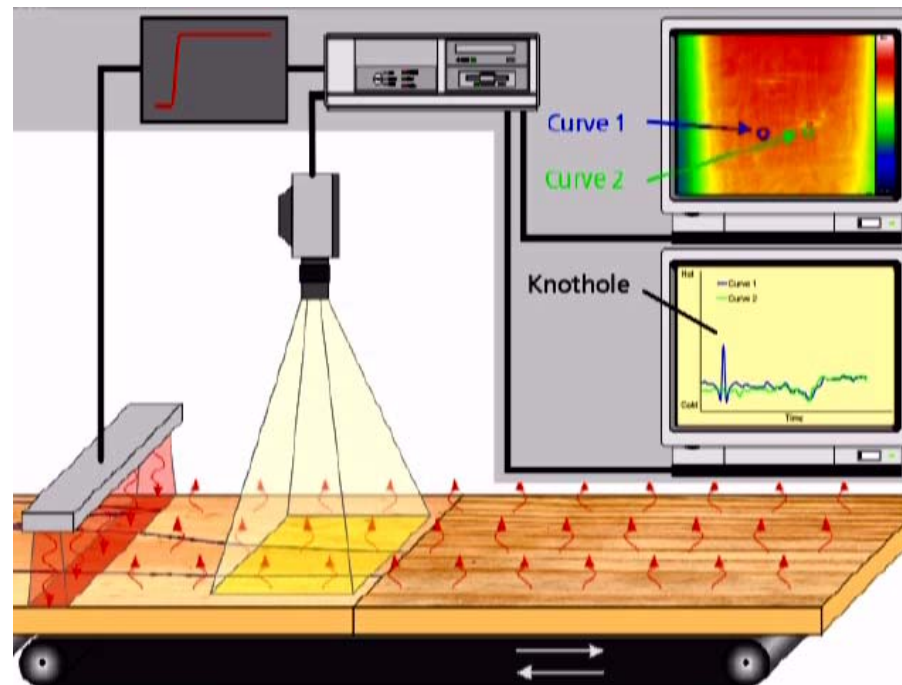
Prinzip der Wärmefluss-Thermographie (2)

- Aktive Wärmefluss-Thermographie



Prinzip der Wärmefluss-Thermographie (3)

- Realisierung der aktiven Online-Thermographie



Prinzip der Wärmefluss-Thermographie (4)

■ Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens

■ Physikalische Auflösungsgrenzen:

- Beugung an der Linsenöffnung

$$r = \frac{1,22 \lambda f}{a}$$

■ Kamerabedingte Auflösungsgrenzen:

- Pixelzahl: 640×512
 - Temporauflösung: 15mK
 - Bildfolge rate: 880 Hz
- ### ■ Durch das Messprinzip bedingte Auflösungsgrenzen
- ΔT hängt von Defektgröße und -tiefe und Materialparametern ab.

Prinzip der Wärmefluss-Thermographie (5)

■ ΔT für einige Verbundwerkstoffe

- Kreisscheibenförmiger Defekt
- d_d : Durchmesser
- l_d : Fehlertiefe
- Dicke: 0,1 mm

d_d [mm]	l_d [mm]	ΔT_{\max} [K]
Glass fibre reinforced plastics		
2	2	0,60
8	2	1,67
2	8	0,00
8	8	0,05
Steel		
2	2	0,09
8	2	0,36
2	8	0,00
8	8	0,03
Aluminium		
2	2	0,02
8	2	0,08
2	8	0,00
8	8	0,01

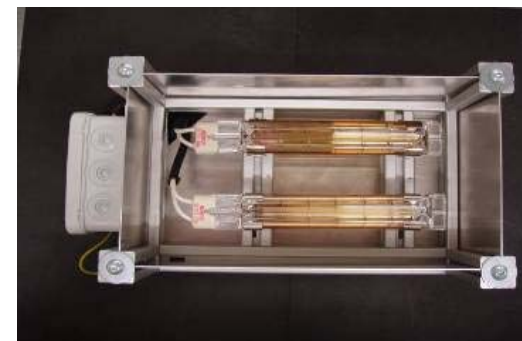
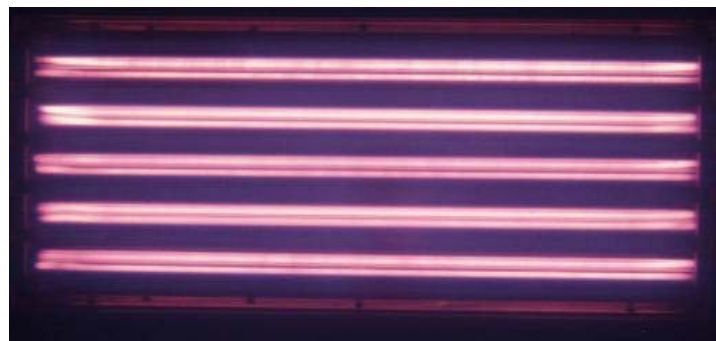
Prinzip der Wärmefluss-Thermographie (6)

■ Pulsphasen-Thermographie (2)

- Puls lässt sich in Sinuswellen zerlegen, $\omega_{\min} \sim 1/\text{Pulslänge}$
- Sinusförmige Anregung (ω): Wärmewelle, Eindringtiefe $\mu = \sqrt{\frac{2\kappa}{\omega C}}$
 κ : Wärmeleitfähigkeit, C: Wärmekapazität
- Fouriertransformation:
Bild(t=0), Bild(Δt), Bild(2 Δt), ..., Bild(N Δt) ($\Delta t = 1/\text{Framerate}$)
→
Bild*($\omega=0$), **Bild*($\Delta\omega$)**, Bild*(2 $\Delta\omega$), ..., Bild*(N $\Delta\omega$)
($\Delta\omega = 1/\text{Beobachtungszeit}$)
- Bild*: Amplituden- und Phasenbild

Prinzip der Wärmefluss-Thermographie (7)

- Optische Möglichkeiten zur thermischen Anregung
 - Blitzlampen
 - Quarzglasstrahler
 - Karbonstrahler
 - Laser



Prinzip der Wärmefluss-Thermographie (8)

- Ultraschall und andere mechanische Anregungsquellen
- Erzeugung von Reibungswärme



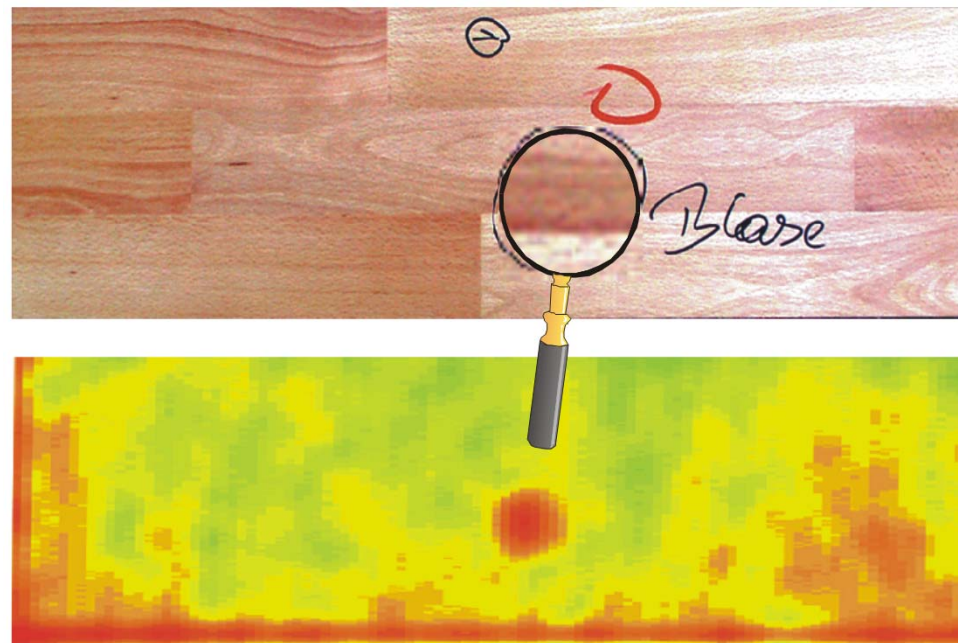
Prinzip der Wärmefluss-Thermographie (9)

- Anregung durch Wirbelströme
 - Nur bei (ferromagnetischen) Metallen
 - Wirbelströme verlaufen oberflächennah
 - Risse behindern Wirbelströme
 - Stromdichte an Rissspitzen besonders hoch
 - Joule'sche Erwärmung



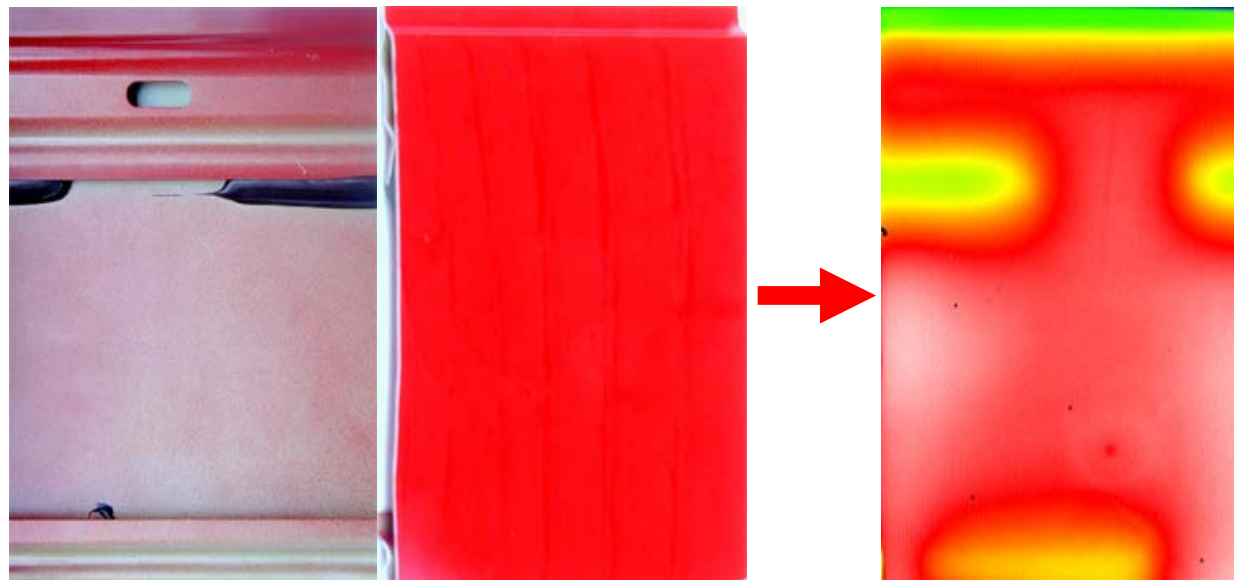
Praxisbeispiele (1)

- Delamination in einer Laminatbodenplatte



Praxisbeispiele (2)

- Erkennung fehlender Dämpfungsmasse durchs Blech



Praxisbeispiele (3)

- Rotorblätter sind hochbelastete Komponenten von Windenergieanlagen
- In der **Fertigung** und bei **Reparaturen** treten vielfach gravierende Qualitätsmängel auf.
- Schadensspektrum reicht von Ertragseinbußen bis zum Totalausfall der Anlage.
- Versicherungen verlangen immer häufiger regelmäßige Prüfungen der Rotorblätter (alle zwei bis vier Jahre).
- Steigende Anforderungen durch Trend zu **Offshore-Anlagen** (Zugänglichkeit !)



Praxisbeispiele (4)

- Mögliche Fehler in Rotorblättern
 - Fehlverklebungen zwischen Steg und Schale
 - Risse, Lufteinschlüsse und Delaminationen
 - Eindringen von Feuchtigkeit oder Hydrauliköl
- Bisherige Prüfverfahren:
 - Sichtprüfung
 - Abklopfen mit dem Hammer
 - Objektive und automatisierbare Verfahren sind derzeit nicht verfügbar



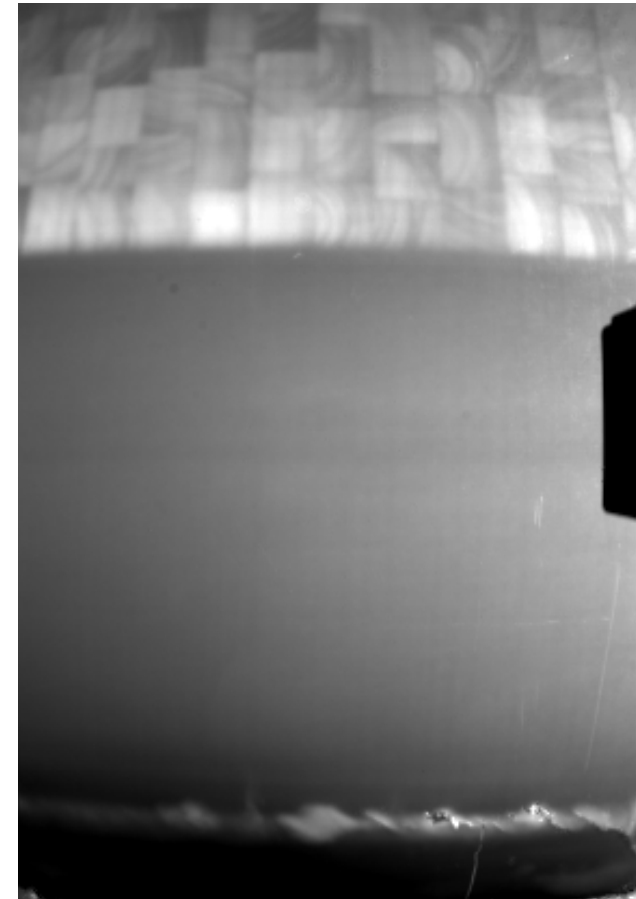
Praxisbeispiele (5)

- Vor-Ort-Messungen an Rotorblättern



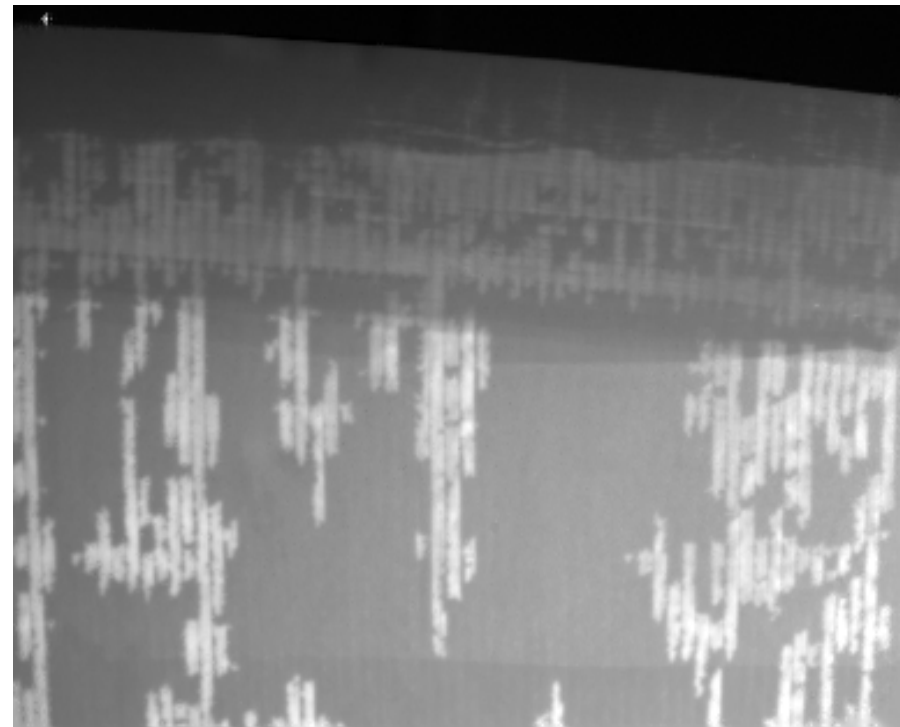
Praxisbeispiele (6)

- Thermographie macht die innere Struktur von Rotorblättern sichtbar
- Oben: Balsaholzklötzchen mit Jahrringen im Sandwichbereich
- Unten: Verklebungsfehler (helle Bereiche)



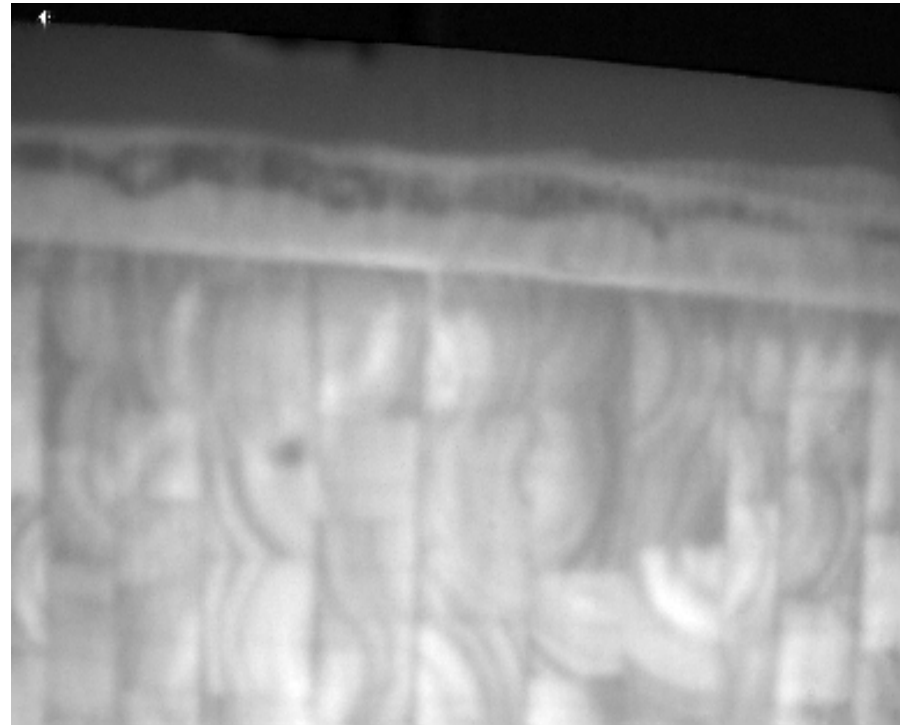
Praxisbeispiele (7)

- Rotorblatt mit Lufteinschlüssen
 - Bild unmittelbar nach Erwärmung aufgenommen



Praxisbeispiele (8)

- Rotorblatt mit Lufteinschlüssen
 - Bild 5 Minuten nach Erwärmung aufgenommen



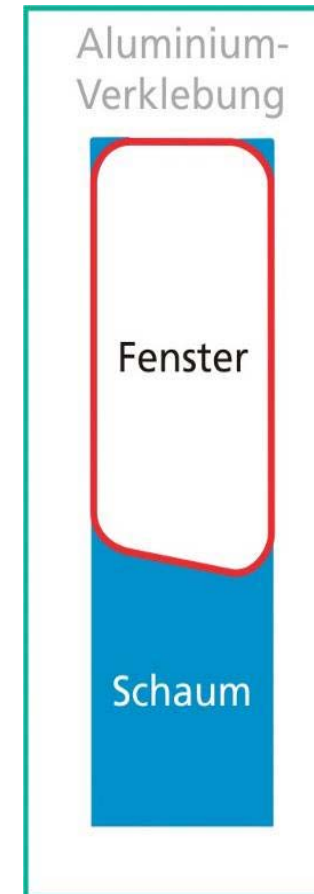
Praxisbeispiele (13)

- Prüfung von U-Bahn-Türen
 - Problem:
Verklebungsfehler an der Außen- und Innenverkleidung
 - Sicherheitsproblem
 - Druckstöße bei Begegnung im Tunnel



Praxisbeispiele (14)

- Problemstellung
 - Ursache der Verklebungsfehler?
 - Welche bereits ausgelieferten und eingebaute Türen sind betroffen?
 - Ist eine Dauerfestigkeit für 20 Jahre gesichert?



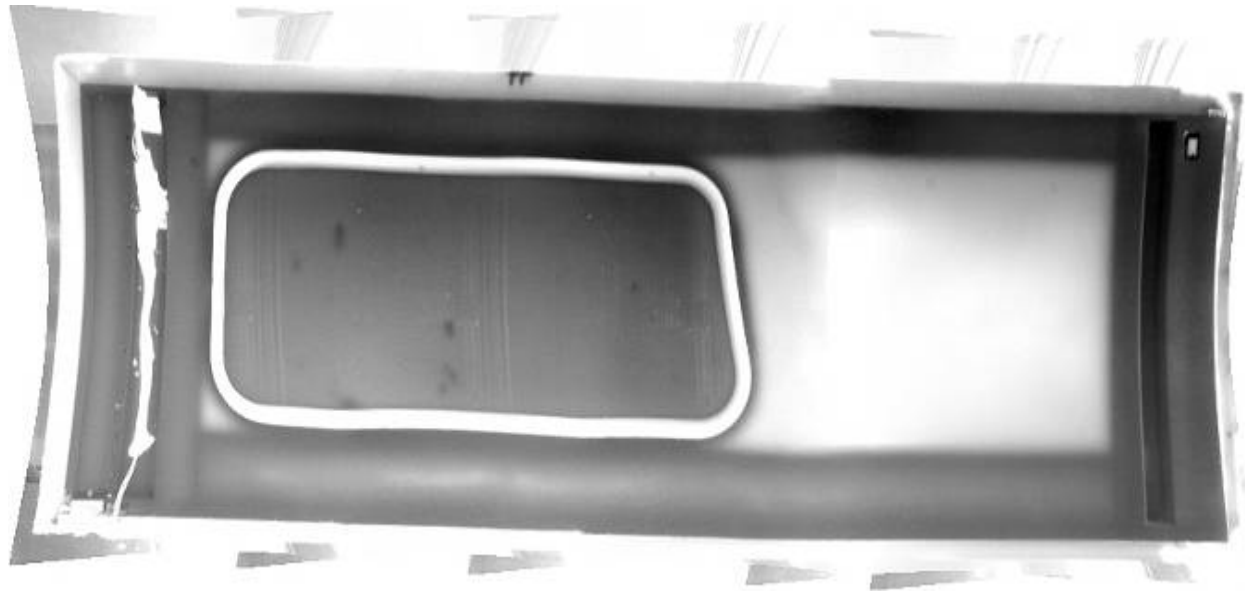
Praxisbeispiele (15)

- Maßnahmen
 - Laboruntersuchungen
 - Messungen vor Ort am Bahnsteig
 - Versuche zur künstlichen Alterung



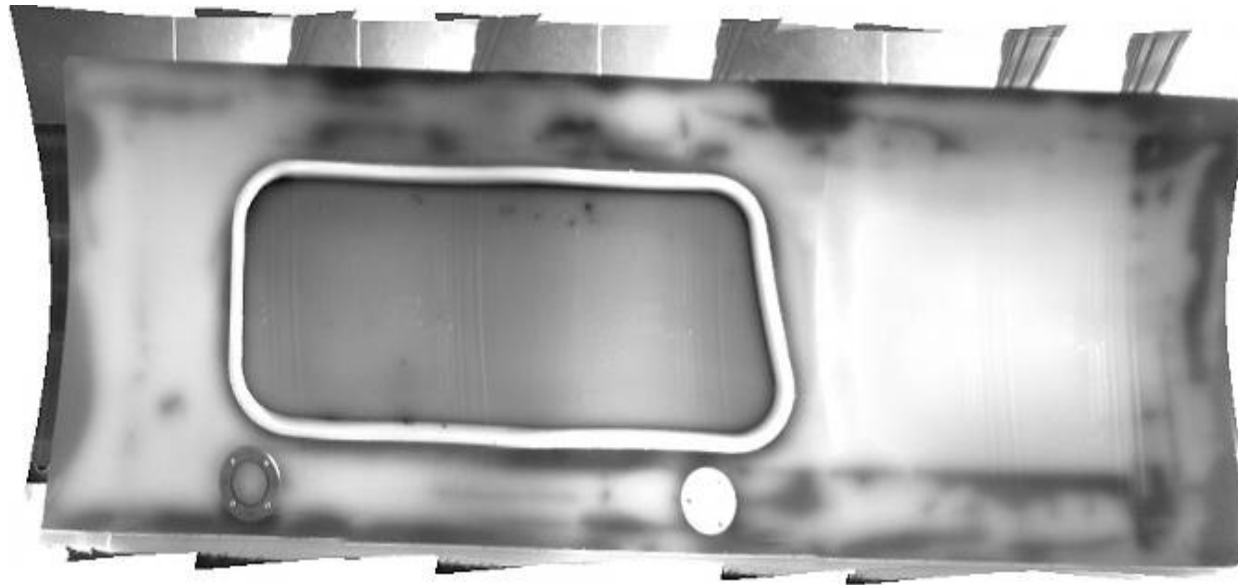
Praxisbeispiele (16)

- Labortest (Innenseite SN06)



Praxisbeispiele (17)

- Labortest (Innenseite SN70)



Praxisbeispiele (18)

- Aufbau für Prüfung am Bahnsteig



Praxisbeispiele (19)

- Problem: Eindringendes Wasser im Dach
 - Degradation des GFK
 - Frostsprengung
- Fragestellungen
 - Welche Dächer sind betroffen?



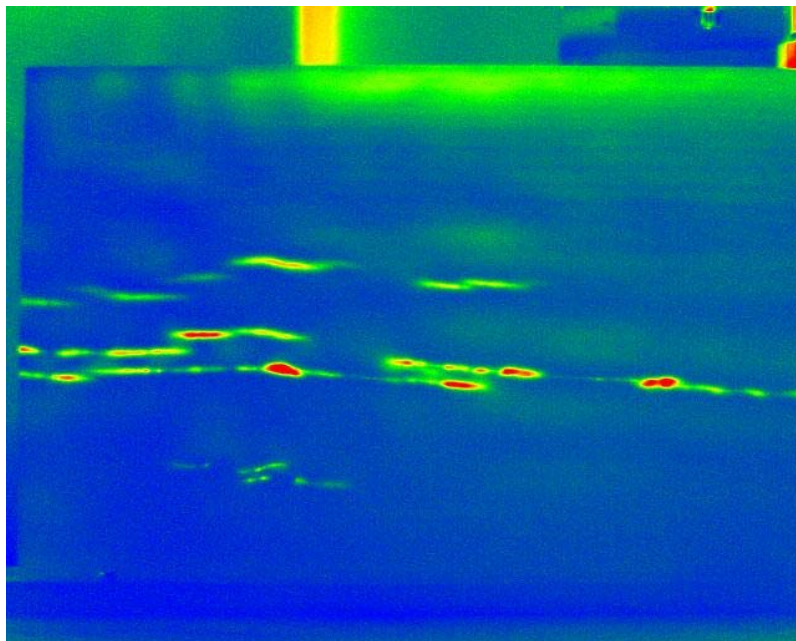
Praxisbeispiele (20)

- Thermographischer Nachweis von eingedrungenem Wasser



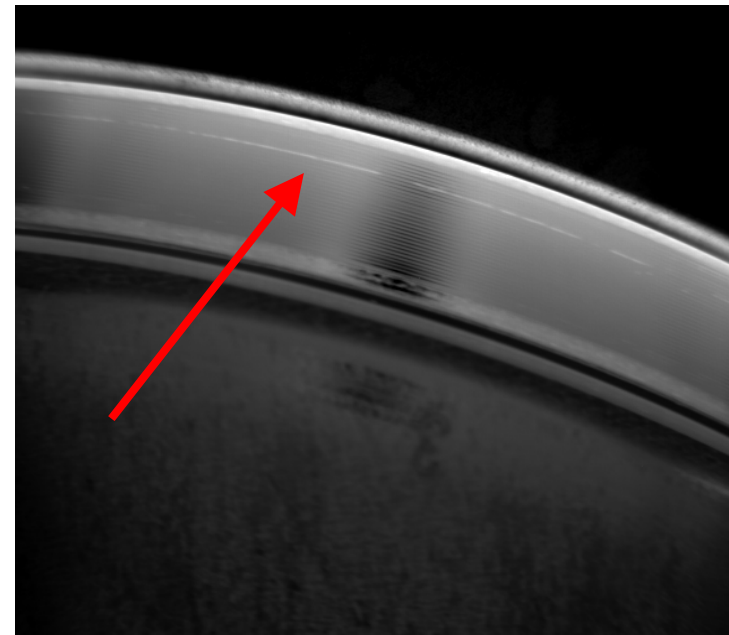
Praxisbeispiele (21)

- Anregung durch Ultraschall



Praxisbeispiele (22)

- Anregung durch Wirbelströme



Zusammenfassung

- Wärmefluss-Thermographie: Schnelle, berührungslose und prozessintegrierbare Methode zur Qualitätskontrolle
- Gut geeignet auch für große Prüfobjekte und hohe Prüfgeschwindigkeiten
- Kann vielfach vor Ort eingesetzt werden
- Leistungsfähigkeit hängt von Material und Defektgröße ab.
- Besonders gut geeignet für nichtmetallische Verbundwerkstoffe.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!