

Willkommen  
Welcome  
Bienvenue



## Thermografieanwendung in Labor und Forschung

an der EMPA, Abteilung Reliability Science and Technology

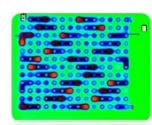
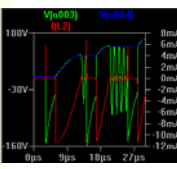
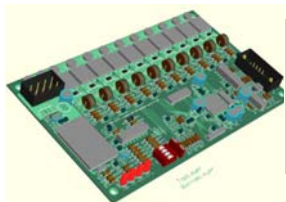
Roman Furrer  
Dipl. Masch. Ing. FH

## Ablauf

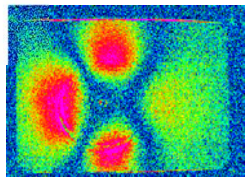
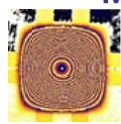


- Vorstellung Abteilung 405
- Temperatur-Dienstleistungs- & Forschungsangebot @Abt405
- IR-Kamera Equipment
- Thermografie in der Fehleranalyse
- Absolut-Temperaturmessungen
  - Prinzip
  - Kalibrierbox
  - Beispiele
- Wärmefluss Thermografie
  - Lock-In & Pulse Thermografie
  - Beispiele
- Varia
  - Thermische Spannungsanalyse.
  - Weitere Thermografie @EMPA

# Abt405 - Vorstellung



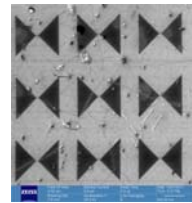
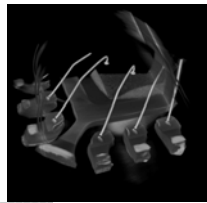
## Messtechnik



## Elektronik & Automation

broken bond wires

FIB cross section: hillock



Graphene structure

## Zuverlässigkeit & Fehleranalyse

## Micro / Nanostrukturen

# Abt405 - Aktivitäten



## Research Topics / Facilities and Tools

Ga-/He-FIBs  
HR-SEM/EDX  
EMMI/OBIRCH  
sample preparation  
2/3-D imaging,  
MC simulation

Reliability/Risk Analysis,  
Physics of failure  
of electronics, photonics,  
power conversion,  
electricity storage

IR, UT, eddy current,  
EMV, R, I, V, C, L-  
2/3-D imaging,  
MC simulation

Micro-, nano-structuring  
and characterisation of  
materials, nanoelectronics,  
photonics, packaging,  
interconnects

**Reliability and Safety  
of materials, devices  
and processes**

X-/γ-ray (IC/PCB),  
ultra-sound (UT),  
image reconstruction  
materials and objects

ps-laser ablation,  
SNOM, FOS,  
ellipsometer  
PLD

Measurement Technology  
electrical, optical, THz, IR,  
strain, stress, temperature,  
thermography, interferometry,  
monitoring

3D-interferometers,  
image correlation,  
2/3-D imaging  
sensors, electronics,  
LabView, FPGA, MP

STS 059 (25.10.2014-24.10.2019): Prüfstelle für physikalische Qualifikation, Zuverlässigkeit und Zerstörungsfreie Prüfung von Materialien, Bauteilen und Systemen

## Temperatur-Dienstleistungs- & Forschungsangebot in der Abt405

- Temperatursensoren wie Pt 100 oder Thermoelemente zur punktweisen Erfassung der Temperatur
- Thermografiekamera zur bildgebenden Erfassung einer Temperaturverteilung
- Pulsthermografie.
- Lock-In Thermografie.
- Thermische Spannungsanalyse.
- (Kalibration von IR-Equipment – 300°C )

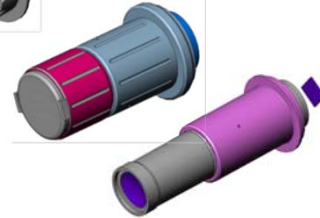
## Thermografiekameras



### Technische Daten:

	<b>CEDIP Jade III MWIR</b>	<b>Hotfind LX</b>
Wellenlängenbereich	3 – 5 $\mu\text{m}$	8 – 14 $\mu\text{m}$
Detektormaterial	InSb	$\mu$ -Bolometer
Detektorauflösung	240 x 320 pixel	288 x 384 pixel
Pixelgrösse	30 x 30 $\mu\text{m}^2$	
Bildrate	170 bps (Vollbild) < 9000 bps (Teilbild)	25 bps
NETD	20 mK	80 mK
Temperaturbereich	-20...+1000 °C	-20...+600 °C

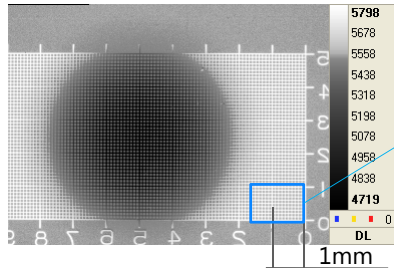
## Auflösung & Optiken der CEDIP JADE III



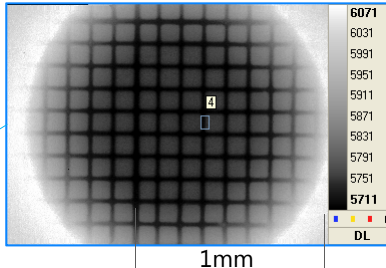
- Maximale Objektgrösse mit 12mm Optik
  - ~ Distanz zu Objekt = Objektgrösse

- Minimale Objektgrösse mit G1 Linse

Ohne Distanzring ~9.7x7.3mm

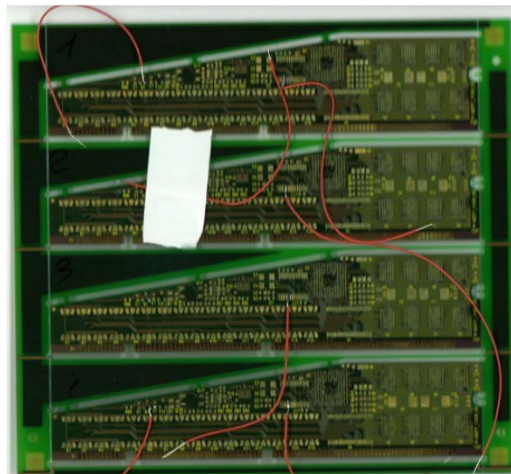


Mit 60mm Distanzring ~1.5x1.1mm



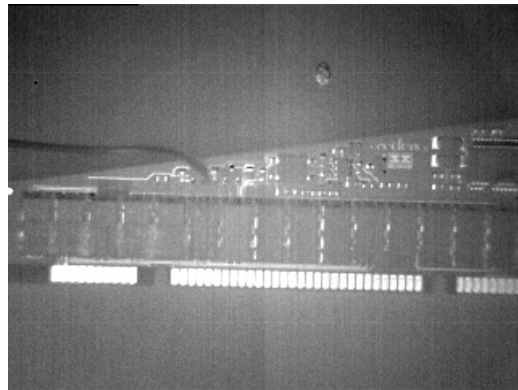
## Einsatzgebiet: Fehleranalyse

- Beispiel: Fehlersuche bei PCB



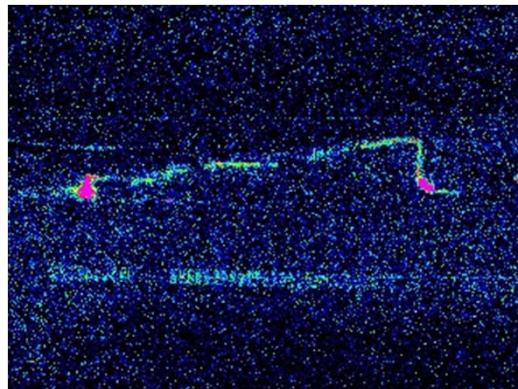
## Einsatzgebiet: Fehleranalyse

- Beispiel: Fehlersuche bei PCB
- Bauteil unter Last -> Fehlstellen werden warm



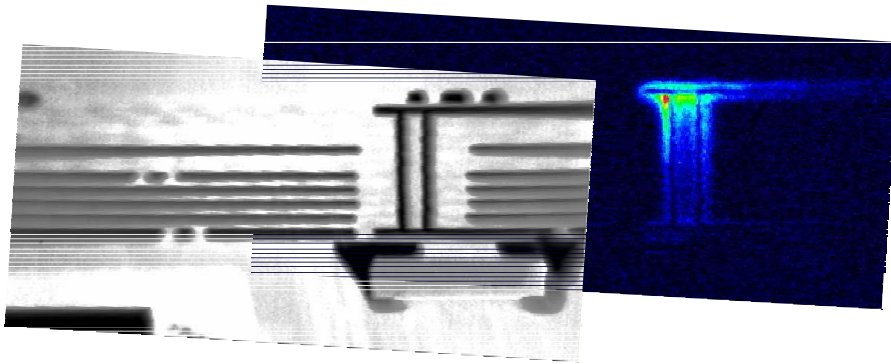
## Einsatzgebiet: Fehleranalyse

- Beispiel: Fehlersuche bei PCB
- Bauteil unter Last -> Fehlstellen werden warm
- Hotspot (ggf. Differenzbild) mit IR gut lokalisierbar



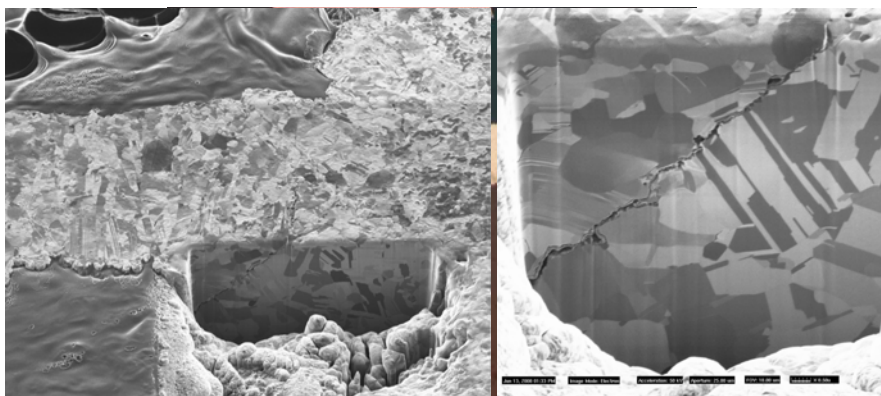
## Einsatzgebiet: Fehleranalyse

- Beispiel: Fehlersuche bei PCB
- Bauteil unter Last -> Fehlstellen werden warm
- Hotspot (ggf. Differenzbild) mit IR gut lokalisierbar
- Genaue Lage bekannt -> Schliff durch Objekt



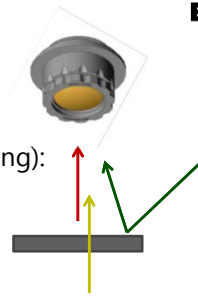
## Einsatzgebiet: Fehleranalyse

- Weitere Analysen mit Auflicht-Mikroskop / FIB / ....



## Einsatzgebiet: «Absolut-Temperaturmessung»

- Vereinfachte Theorie (gilt bei Differenzmessung):
  - Strahlung vom Objekt
  - $T = (T_{Obj} \times \epsilon) + (T_{refl} \times \rho) + (T_{Trans} \times \tau)$
- Arbeiten im Labor
  - Umgebung ist konstant
  - Grössere Umgebungsstrahler nicht vorhanden/lassen sich gut kaschieren
  - Meistens Objekte nicht Transparent



►  $T = (T_{Obj} \times \epsilon) + \cancel{(T_{refl} \times \rho)} + \cancel{(T_{Trans} \times \tau)}$

- Objekte sind temperaturabhängige, graue (selektive) Strahler



## Einsatzgebiet: «Absolut-Temperaturmessung»

- Emissivität muss genau bekannt sein
  - Emissivitätswert aus Tabellen zu ungenau
    - Meist ohne Infrarotspektrumsangabe
    - Meist ohne Temperaturangabe

Material (material temperature)	Emissivity
Aluminium, bright rolled (170 °C)	0.04
Aluminium, not oxidized (25 °C)	0.02
Aluminium, not oxidized (100 °C)	0.03
Aluminium, heavily oxidized (93 °C)	0.20
Aluminium, highly polished (100 °C)	0.09

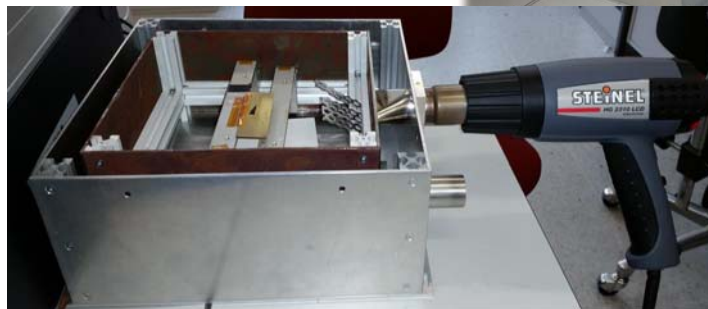
- Beispiel, Einfluss Emissivitäts-fehler von 0.05

Gemessene T (ohne Korrektur)	Korrigierte Temperatur		
	T (ε+0.05)	T (ε)	T (ε-0.05)
60°C (ε=0.8)	65.5°C	67.7°C	70.2°C
60°C (ε=0.4)	93.6°C	100.1°C	108°C

Annahme Umgebungstemperatur 22°C

## Einsatzgebiet: «Absolut Temperaturmessung»

- Kalibrierbox
  - Heizkammer zur Temperierung von Objekten von RT - 300°C

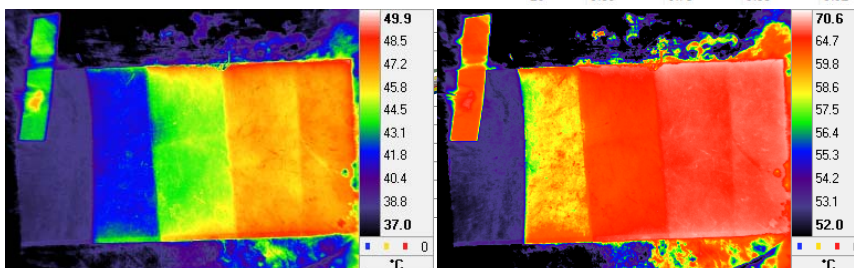
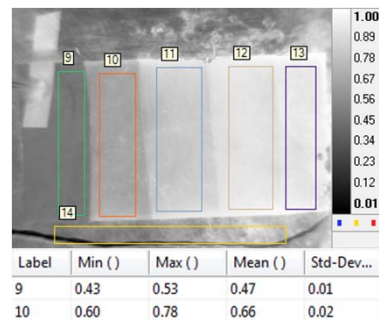


## Einsatzgebiet: «Absolut-Temperaturmessung»

- Berechnung der Emissivität aus zwei Temperaturwerten

$$\varepsilon = \frac{I_{\text{Kamera}}(T2_{\text{Obj}}) - I_{\text{Kamera}}(T1_{\text{Obj}})}{I_{\text{BB}}(T2_{\text{Obj}}) - I_{\text{BB}}(T1_{\text{Obj}})}$$

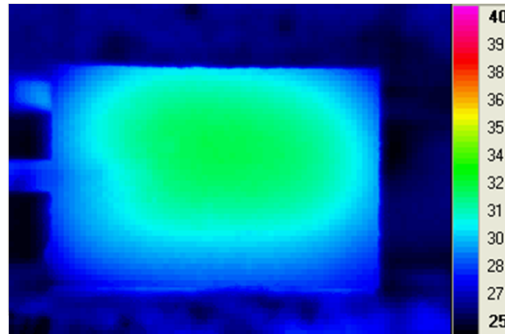
$$\varepsilon = \frac{(x + 273.15)^4 - (y + 273.15)^4}{(70.6 + 273.15)^4 - (49.9 + 273.15)^4}$$





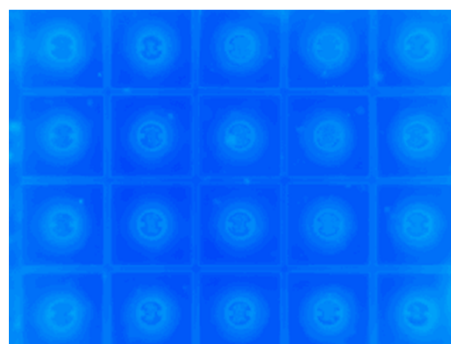
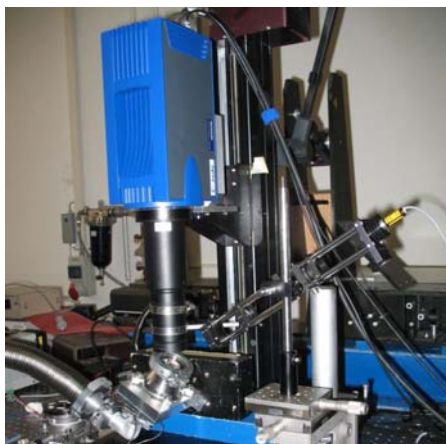
## Einsatzgebiet: «Absolut-Temperaturmessung»

- Beispielmessungen
  - Knochentemperatur während Bearbeitung (Bohren, Sägen, Erwärmen)



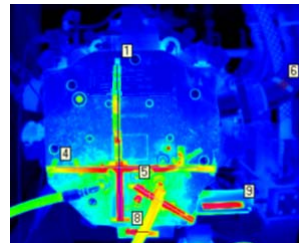
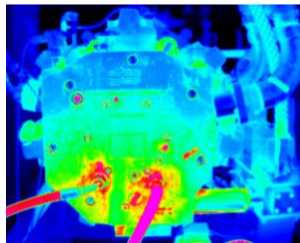
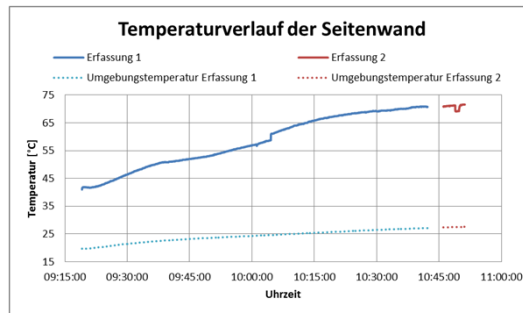
## Einsatzgebiet: «Absolut-Temperaturmessung»

- Beispielmessungen
  - Temperaturverhalten von Micro Strukturen im Vakuum, Laserangeregt



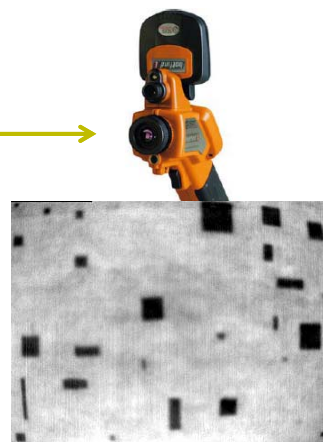
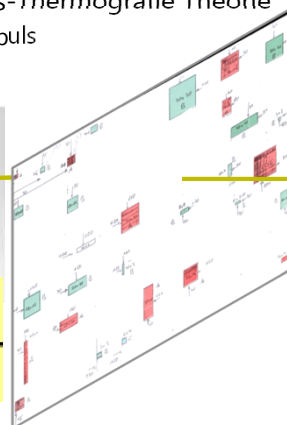
## Einsatzgebiet: «Absolut Temperaturmessung»

- Beispielmessungen
  - Radialkolbenpumpe auf Betriebstemperatur
  - Emissivitätsbestimmung nicht möglich
- ▶ Bspw. Klebeband mit bekannter Emissivität verwenden.



## Einsatzgebiet: «Wärmefluss Thermografie»

- Vereinfachte Puls-Thermografie Theorie
  - kurzer Wärmepuls
  - Transmission



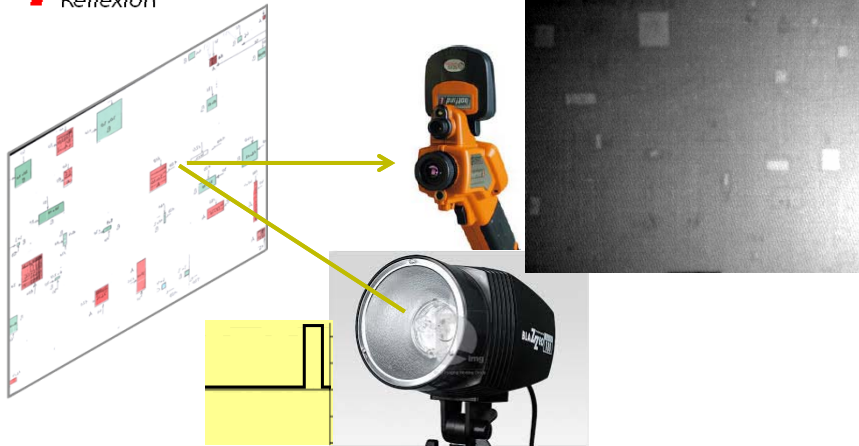
Mittelbild 0.1-1s nach Blitz

## Einsatzgebiet: «Wärmefluss Thermografie»

### ■ Vereinfachte Puls-Thermografie Theorie

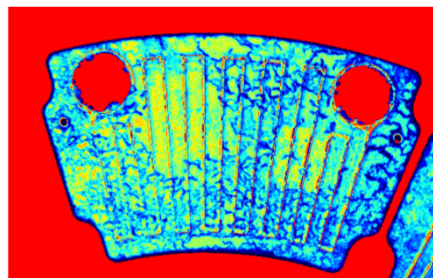
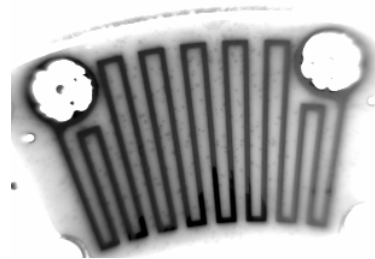
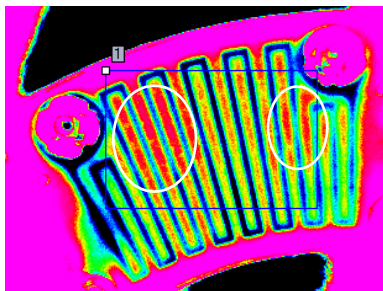
- Kurzer Wärmepuls
- Reflexion

Mittelbild 0.1-1s nach Blitz



## Einsatzgebiet: «Wärmefluss Thermografie»

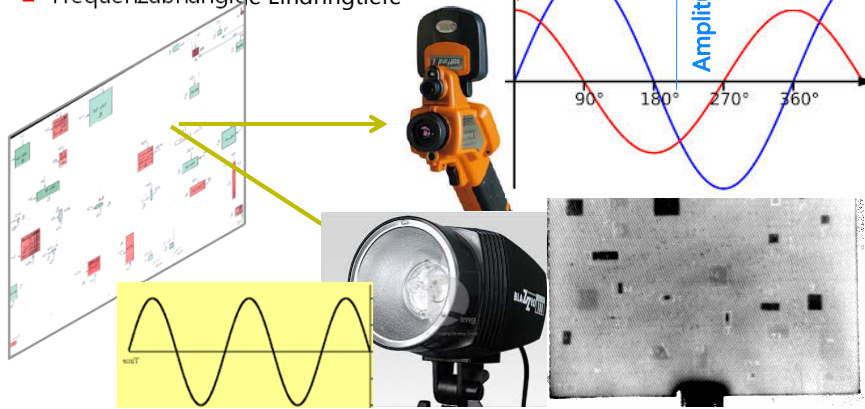
- Heizelement, IR UT
- Blitz, Reflexion



## Einsatzgebiet: «Wärmefluss Thermografie»

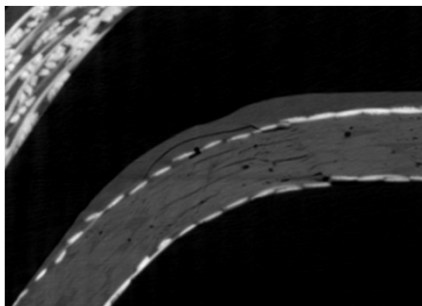
### ■ Vereinfachte Lock-In-Thermografie Theorie

- Zyklische Anregung
- Phasen & Amplituden –Auswertung
- Frequenzabhängige Eindringtiefe



## Einsatzgebiet: «Wärmefluss Thermografie»

- Aktuelle Forschung: Kombination und Vergleich mehrerer ZfP Verfahren bei Faserverstärkten Kunststoffen



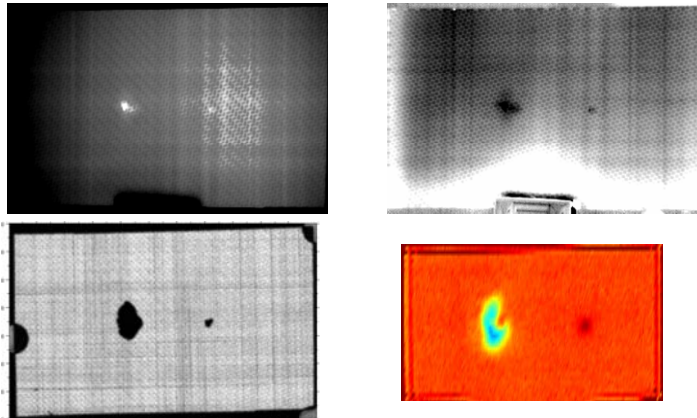
Computertomografie



Thermografie, 0.07Hz, Phase<sup>2</sup>

## Einsatzgebiet: «Wärmefluss Thermografie»

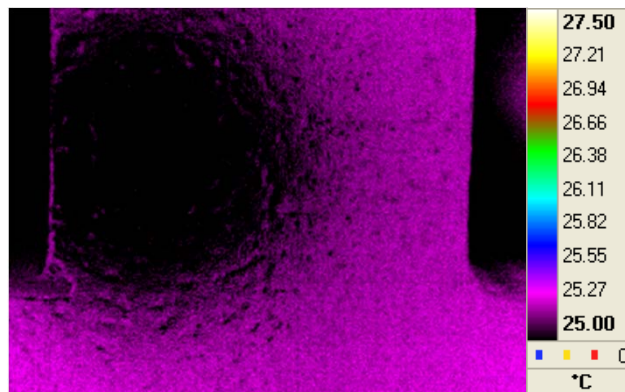
- Thermografie, Amplituden & Phasen Bild 20mHz



- Ultraschall (Wasserbad Bodenecho, Luftgekoppelter Ultraschall)

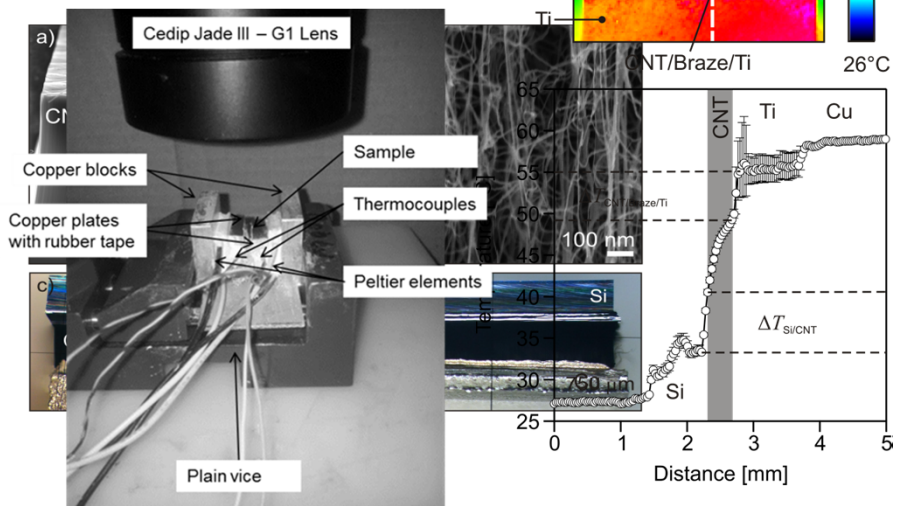
## Varia, Weitere Thermografie

- Versuche an Zugmaschine
  - Wie sieht Wärmeentwicklung vor Abriss aus?
  - Lässt sich ein Versagen voraussagen?



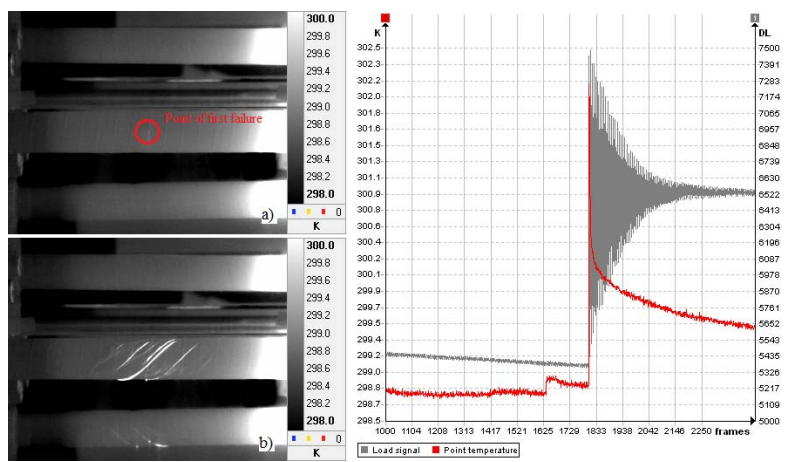
# Varia, Weitere Thermografie

■ Wärmewiderstand



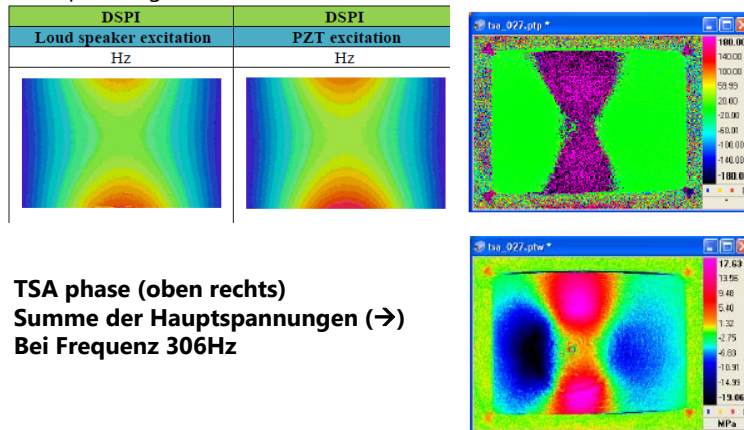
# Varia, Weitere Thermografie

■ EU Projekt: Matera  
■ FAILURE AND DAMAGE IN CFRP TORSION TUBES



## Varia, Weitere Thermografie

- ADVISE Projekt
  - Referenz-Material mit reproduzierbaren Verschiebungs-/Spannungsfelder konstruieren & validieren



## Letzte Folie

- Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!