

Thermografie Forum Eugendorf  
2019

# Vergleich von Induktions- und Blitzthermografie

**C. Tuschl<sup>1</sup>, B. Oswald-Tranta<sup>2</sup>**

27. 09 .2019,  
Eugendorf



1. Materials Center Leoben Forschung GmbH  
Roseggerstraße 12, A-8700 Leoben  
Tel.: +43 3842 45922-0, Fax: +43 3842 45922-500  
[mclburo@mcl.at](mailto:mclburo@mcl.at), <https://www.mcl.at>



2. Institute for Automation, Montanuniversität Leoben  
Peter-Tunner-Strasse 27, A-8700 Leoben  
Tel: +43 3842 5301, Fax: +43 3842 5302  
[automation@unileoben.ac.at](mailto:automation@unileoben.ac.at), <http://automation.unileoben.ac.at>

- Präsentation der Verfahren
- Vergleich der Verfahren für metallische Bauteile
- Vergleich der Verfahren für COMPOSITE- Bauteile
- Vergleich der Verfahren für CFK- Bauteile
- Zusammenfassung und Ausblick

## ➤ Präsentation der Verfahren

- Induktiv Thermografie (Aufbau, Verfahren, Auswertung)
- Blitzthermografie ( Aufbau, Verfahren, Auswertung)
- Anwendungsbereiche der beiden Verfahren

## ➤ Vergleich der Verfahren für metallische Bauteile

- Induktiv Thermografie mittels Scanning-Verfahren
- Blitzthermografie in Transmission und Reflexion

## ➤ Vergleich der Verfahren für COMPOSITE- Bauteile

- Induktiv Thermografie mit Helmholtz-Spule
- Blitzthermografie in Transmission und Reflexion

## ➤ Vergleich der Verfahren für CFK- Bauteile

- Induktiv Thermografie mit Ringspule und Helmholtz-Spule
- Blitzthermografie in Transmission und Reflexion

## ➤ Zusammenfassung

## ➤ Generator:

- Leistung 10kW
- Arbeitsfrequenz ~ 100kHz
- Heizpuls 0.1 – 1 Sekunde

## ➤ Gekühlte Infrarotkamera (InSb Detektor):

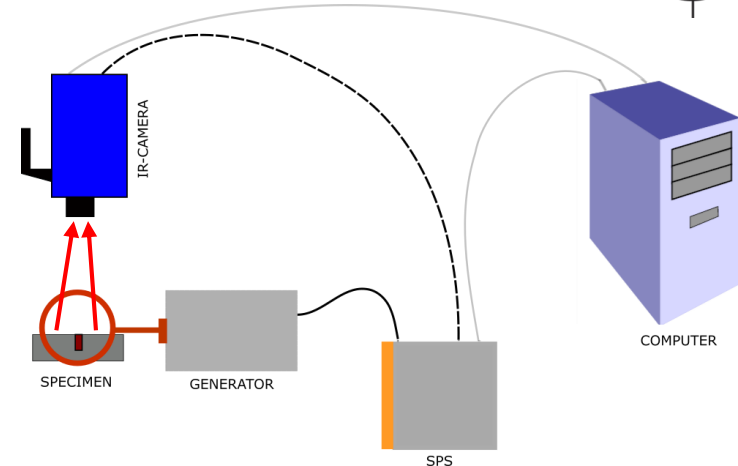
- Bildrate 180 Bilder/Sekunde bei 1280 x 1024 Pixel

## ➤ Steuerung

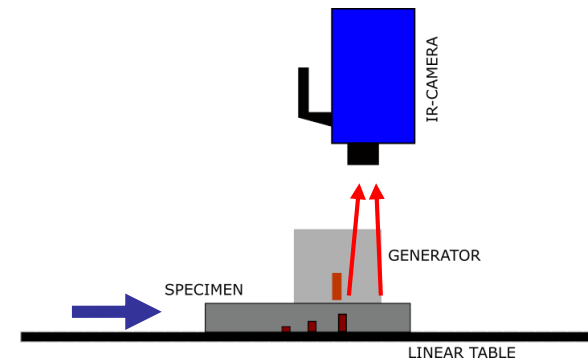
- SPS für Generatorsteuerung und Kameratrigger
- Automatisierte Messung und Auswertung am PC; Software entwickelt am Institut für Automation, Montanuniversität Leoben

## ➤ Auswertung:

- Pulse phase thermography (PPT) – Fourier Transformation der Aufheiz- und Abkühlkurve

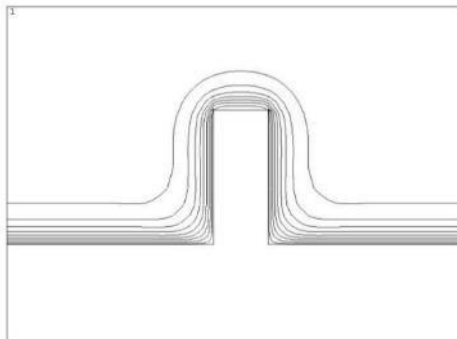


*Versuchsaufbau für statische Induktivthermografie*

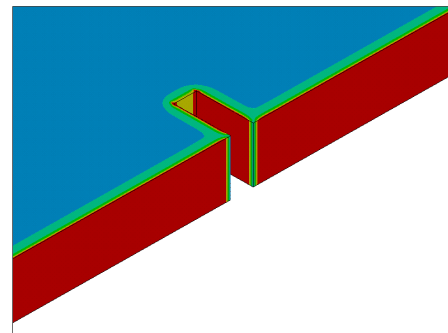


*Versuchsaufbau für scannende Induktivthermografie*

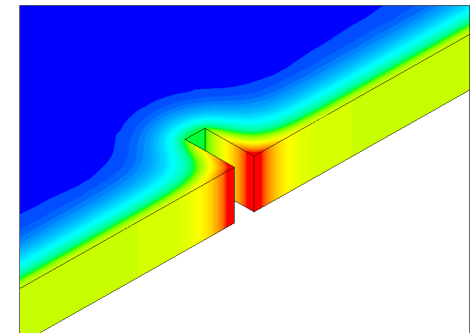
- Bauteil wird durch induzierten Wirbelstrom geringfügig mit einem kurzen Puls (0.1-1s) erwärmt
- Die zusätzliche Erwärmung an den Kanten eines Oberflächenrisses (im Falle eines magnetischen Materials) entsteht
  - durch die Ablenkung des Wirbelstromes
  - und durch Wärmestau in den Kantenbereichen.
- Finite Element Simulation: elektromagnetischer Induktionsprozess und thermische Diffusion gekoppelt (ANSYS multiphysics package)<sup>[2]</sup>
- Beispiel (*Risstiefe: 1 mm; Eindringtiefe Wirbelstrom: 0.1 mm*):



*Wirbelstromverteilung  
um einen Riss herum*



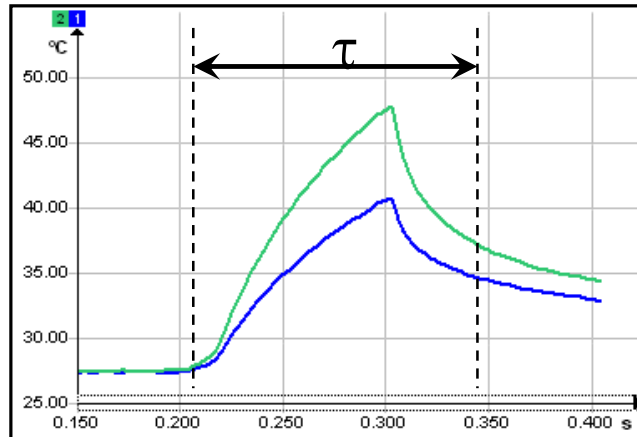
*Joule Erwärmung*



*Temperaturverteilung*

[2] B. Oswald-Tranta, G. Wally: "Thermo-inductive surface crack detection ...", 9th ECNDT, Berlin, 2006



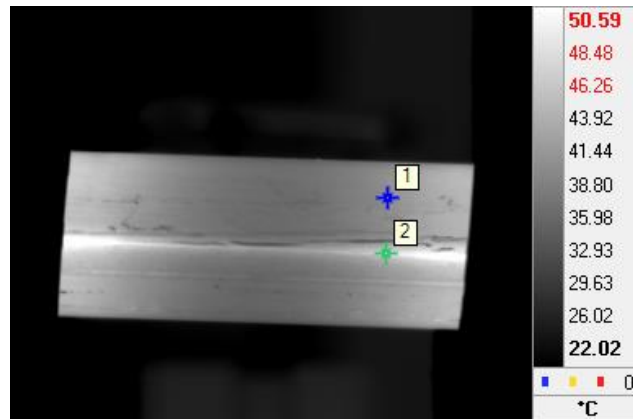


Aufheiz- und Abkühlkurve zweier Pixel

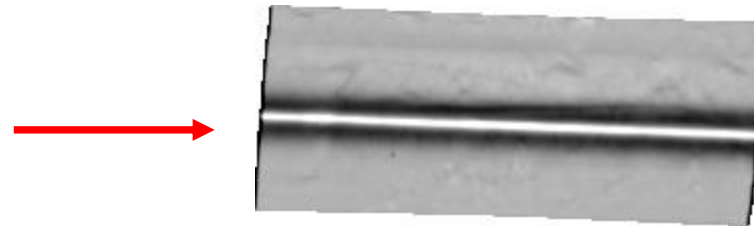
- Mittels Fourier Transformation wird ein Phasenwert für jedes Pixel berechnet:

$$F_{\tau} = \int_0^{\tau} T(t) e^{-i2\pi/\tau} dt \quad \Phi = \arctan\left(\frac{\text{Im}(F_{\tau})}{\text{Re}(F_{\tau})}\right)$$

- Durch das Phasenbild können Effekte wie: inhomogene Erwärmung, Oberflächeneffekte (Kratzer, Emissivitätsunterschiede) verringert werden



Temperaturbild nach 0.1s Heizdauer



Phasenbild

## ➤ Blitzlampe:

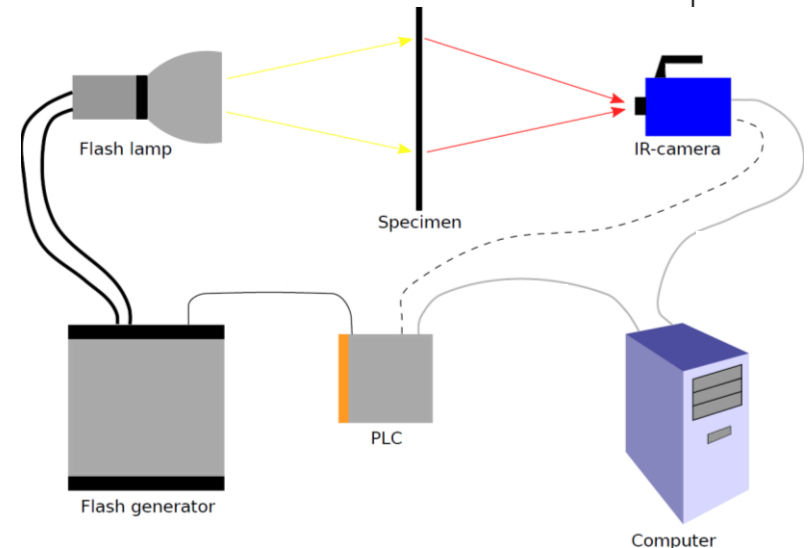
- Leistung 6kJ
- Blitzpuls ~ 1ms

## ➤ Gekühlte Infrarotkamera (InSb Detektor):

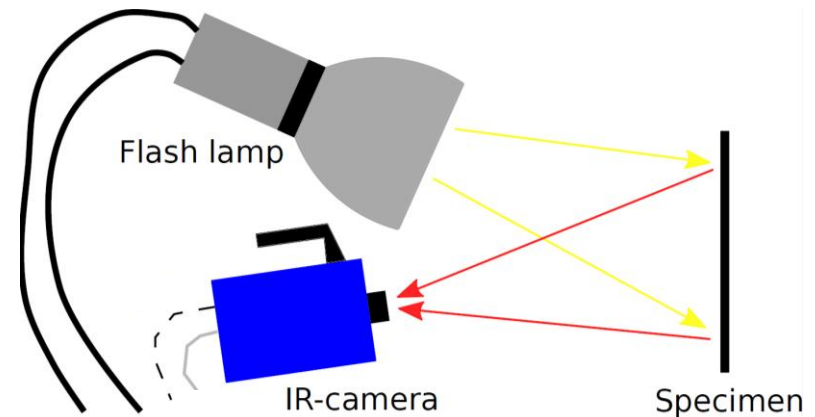
- Bildrate 180 Bilder/Sekunde bei 1280 x 1024 Pixel

## ➤ Auswertung

- In Transmission: Pulse phase thermography (PPT) – Fourier Transformation der Aufheiz- und Abkühlkurve
- In Reflexion: PPT und thermographic signal reconstruction (TSR) – erste und zweite logarithmische Ableitung zu einem Zeitpunkt  $t$

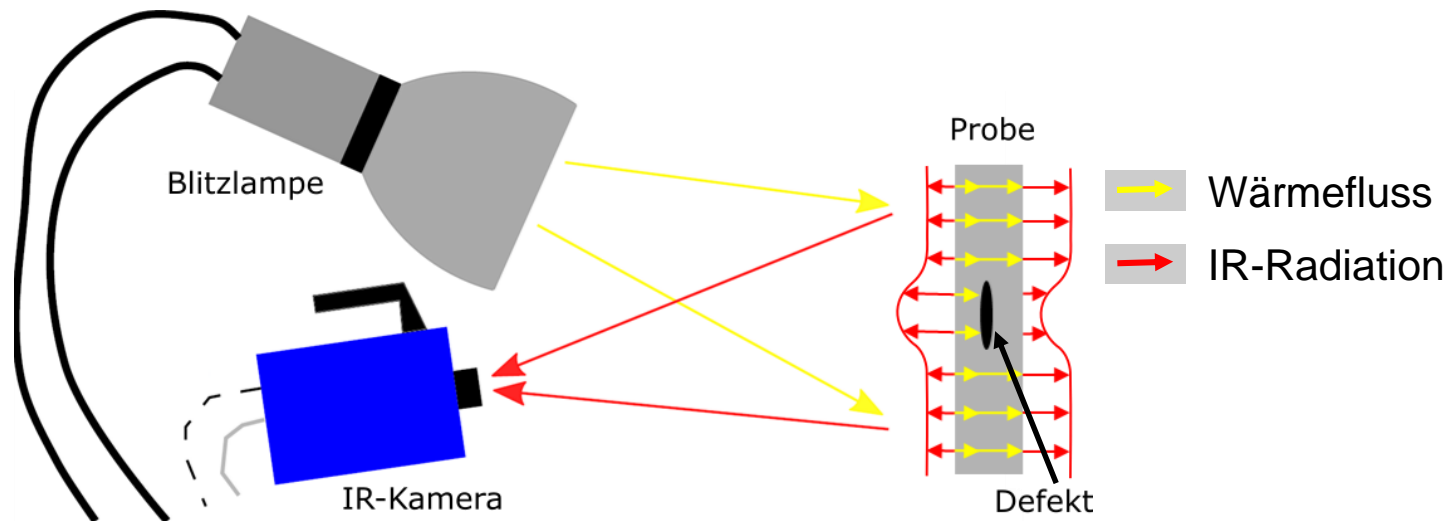


*Versuchsaufbau in Transmission*



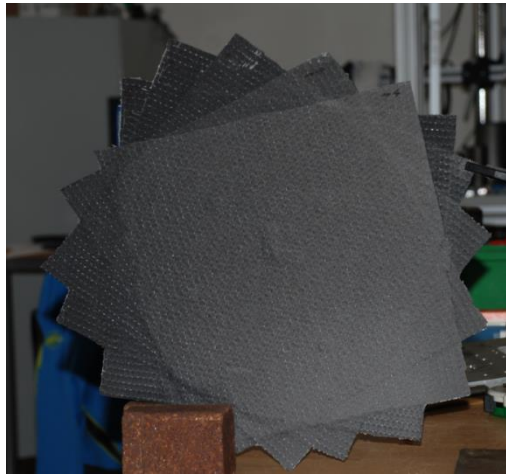
*Versuchsaufbau in Reflexion*

- Der starke und kurze ( $<1\text{ms}$ ) Blitzpuls wird durch die Oberfläche einer Probe absorbiert und in Wärme umgewandelt
- Es entsteht ein Wärmefluss zum Temperatenausgleich in Richtung der Blitz abgewandten Seite der Probe.
- Defekte im Bauteil beeinflussen diesen Wärmefluss
- Diese Unterschiede sind mit der IR-Kamera zu erkennen



*Wärmefluss durch eine Probe*

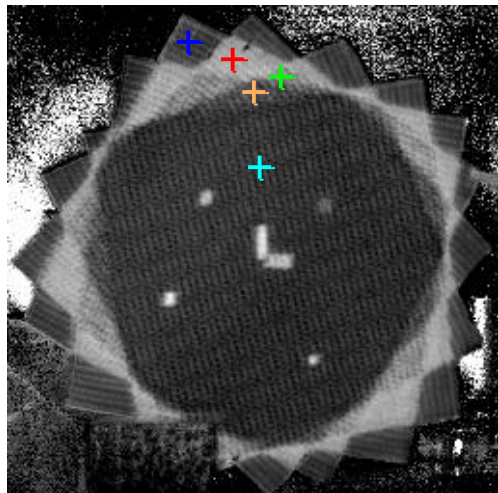




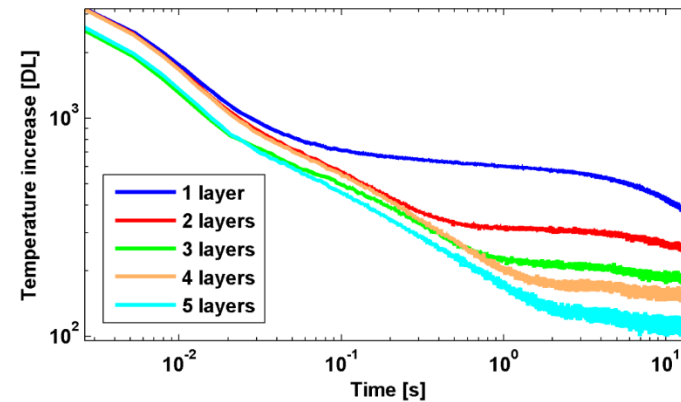
*5-schichtige CFK-Probe mit künstl. Delaminationen*



*Blitzthermografie in Reflexion*



*Phasenbild*



*Temperaturkurven der unterschiedlichen Schichten*

## ➤ Präsentation der Verfahren

- Induktiv Thermografie (Aufbau, Verfahren, Auswertung)
- Blitzthermografie ( Aufbau, Verfahren, Auswertung)
- Anwendungsbereiche der beiden Verfahren

## ➤ Vergleich der Verfahren für metallische Bauteile

- Induktiv Thermografie mittels Scanning-Verfahren
- Blitzthermografie in Reflexion

## ➤ Vergleich der Verfahren für COMPOSITE- Bauteile

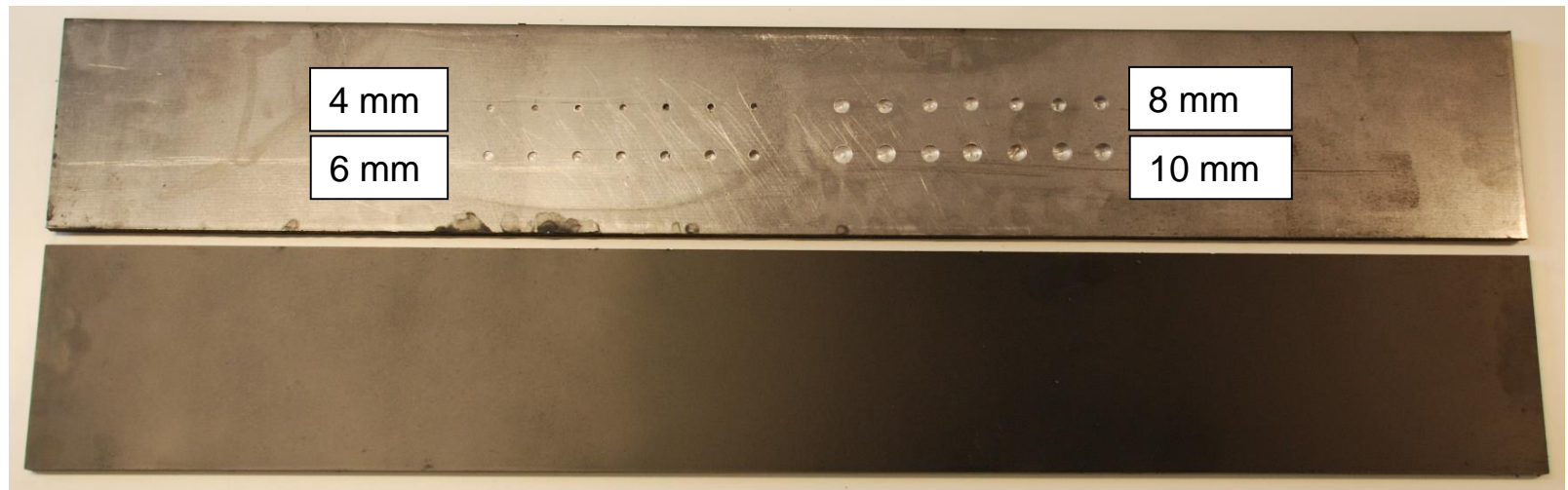
- Induktiv Thermografie mit Helmholtz-Spule
- Blitzthermografie in Transmission und Reflexion

## ➤ Vergleich der Verfahren für CFK- Bauteile

- Induktiv Thermografie mit Ringspule und Helmholtz-Spule
- Blitzthermografie in Transmission und Reflexion

## ➤ Zusammenfassung

- 1m lang, ferro-magnetische Platte
- 10mm dick
- Fehlerdurchmesser: 4, 6, 8, 10 mm
- Fehlertiefe: 3-9 mm in 1mm Schritten (4x7 künstlich erzeugte Defekten)
- Oberfläche wurde schwarz lackiert, sonst wäre sie sehr stark spiegelnd. Bei weniger spiegelnder Oberfläche ist keine Lackierung notwendig.

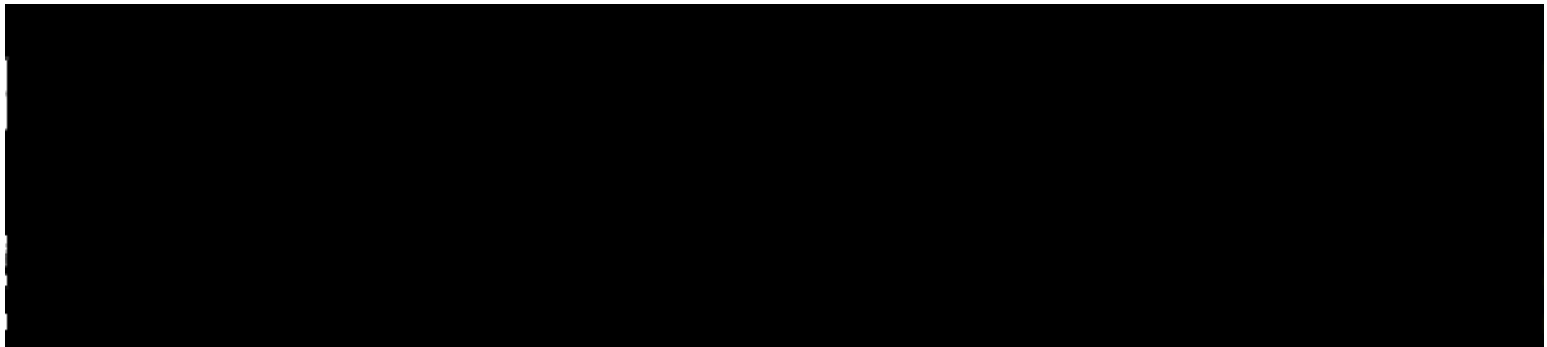


*Lange Lochplatte mit unterschiedlichen Fehlergrößen und -tiefen*



*Infrarotbild der Kamera*

- Wenn eine bestimmte Stelle des Prüfobjektes den gesamten Sichtbereich der Kamera durchgelaufen ist, werden für diese Stelle die gesammelten Temperaturdaten sofort ausgewertet und die Phase berechnet.



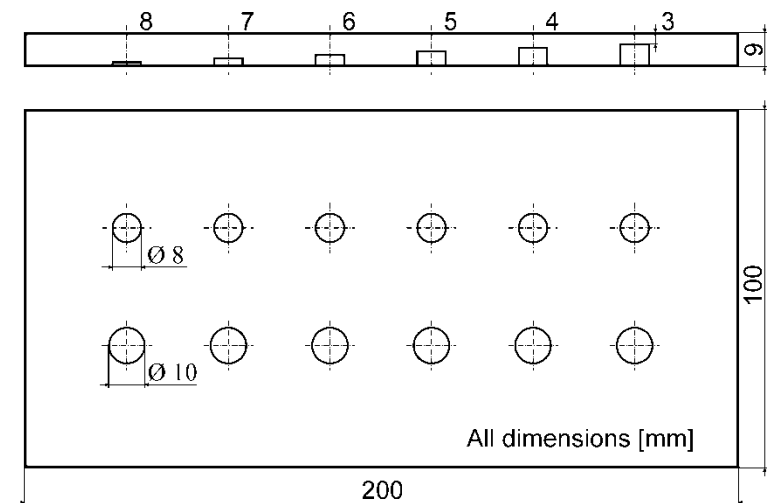
*Mit SPPT berechnetes Phasenbild*



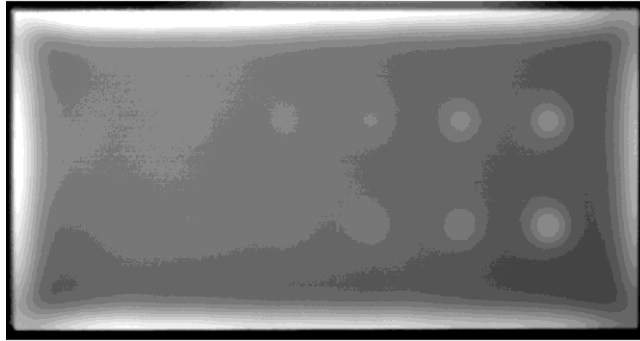
- 9mm dicke Stahlplatte
- Flache Löcher an der Rückseite mit Durchmesser von 4 - 10 mm
- Fehlertiefe: 3 – 8 mm



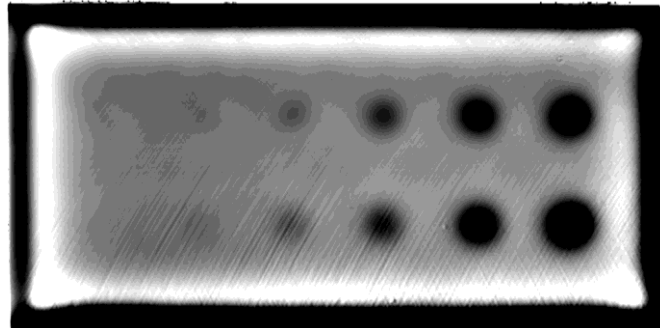
*Ansicht: Unterseite der Lochplatte*



*Lochdurchmesser und -tiefen*



*Temperaturbild der Probe*

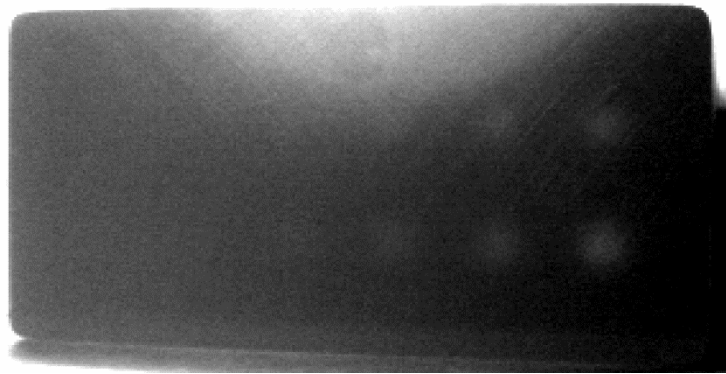


*Phasenbild der Probe*



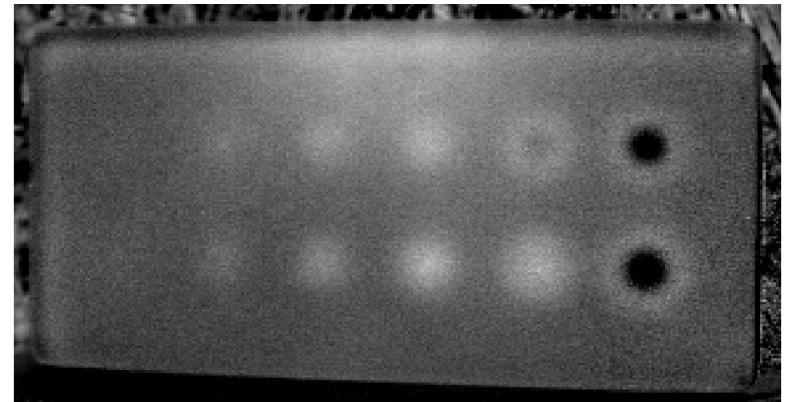
*1. Ableitung mit TSR-Verfahren*

- Temperaturbild (aus einer Pixelspalte gebildet)
  - Neue Bildsequenz
    - Aus allen Pixelspalten IR-Bilder
    - Verschiebung der Bilder zu identischer Position
  - Fourier Transformation der neuen Bildsequenz um ein Phasenbild zu bekommen
- Scanning pulse phase thermography (SPPT)**
- Im Phasenbild werden auch tiefere Fehler sichtbar
  - Auch im TSR-Verfahren sind die Fehler sehr gut sichtbar

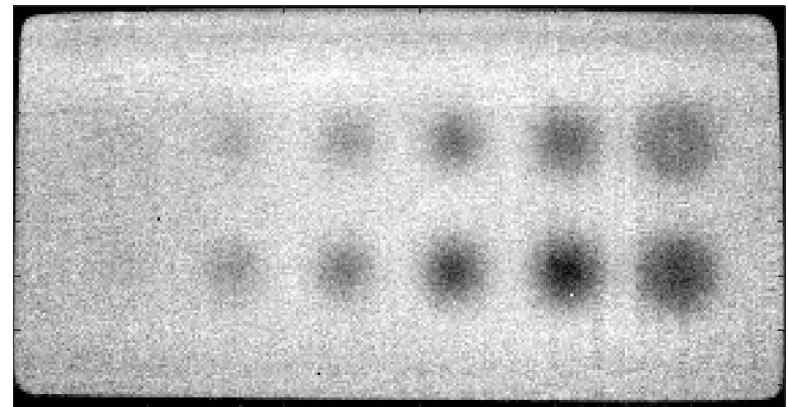


*Temperaturbild nach 1.7 s*

- Die Temperaturänderung der abkühlenden Oberfläche kann mit der Fourier Transformation als Phasenbild ausgewertet werden (PPT).
- Weiters können Ableitungen der Temperaturänderung zu gewissen Zeitpunkten zur Evaluierung verwendet werden. (TSR).



*Phasenbild, berechnet für 2.5 s Dauer*

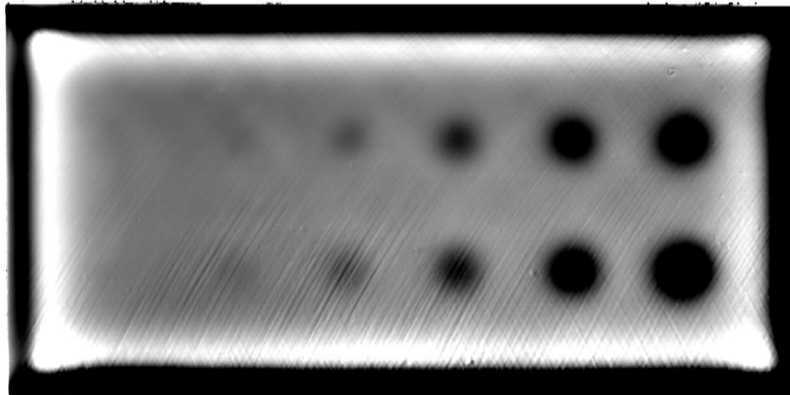


*Zweite Ableitung, berechnet bei  
0.0981 sek.*

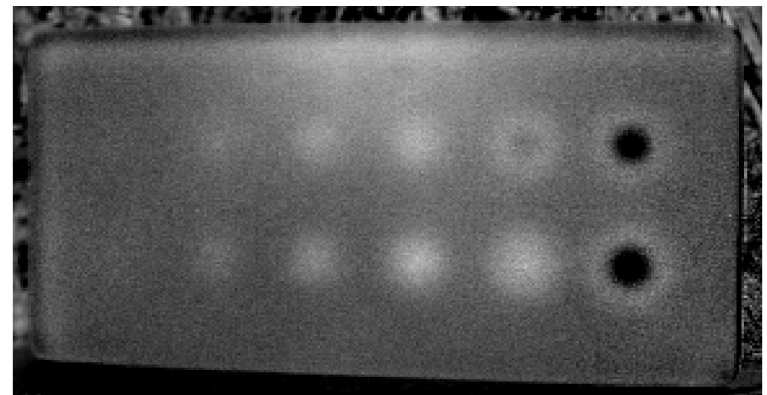




- Phasen- und Ableitungsbilder haben in beiden Techniken bessere Auflösung, als die reinen Temperaturbilder
- SPPT hat besseres Signal-Rauschen Verhältnis, weil die Heizung gleichmäßiger und effizienter ist
- SPPT kann kontinuierlich durchgeführt werden.  
Bei Blitzthermografie können nur bestimmte Ausschnitte einer größeren Fläche auf einmal geprüft werden, die Teilbilder müssen nachträglich zusammengefügt werden.



*Phasenbild bei SPPT*



*Phasenbild bei Blitzthermografie*



➤ Präsentation der Verfahren

- Induktiv Thermografie (Aufbau, Verfahren, Auswertung)
- Blitzthermografie ( Aufbau, Verfahren, Auswertung)
- Anwendungsbereiche der beiden Verfahren

➤ Vergleich der Verfahren für metallische Bauteile

- Induktiv Thermografie mittels Scanning-Verfahren
- Blitzthermografie in Reflexion

➤ Vergleich der Verfahren für COMPOSITE- Bauteile

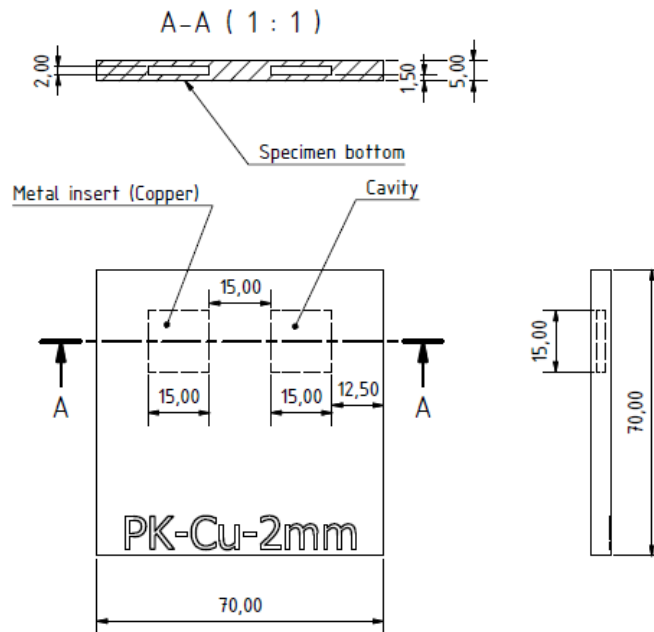
- Induktiv Thermografie mit Helmholtz-Spule
- Blitzthermografie in Transmission und Reflexion

➤ Vergleich der Verfahren für CFK- Bauteile

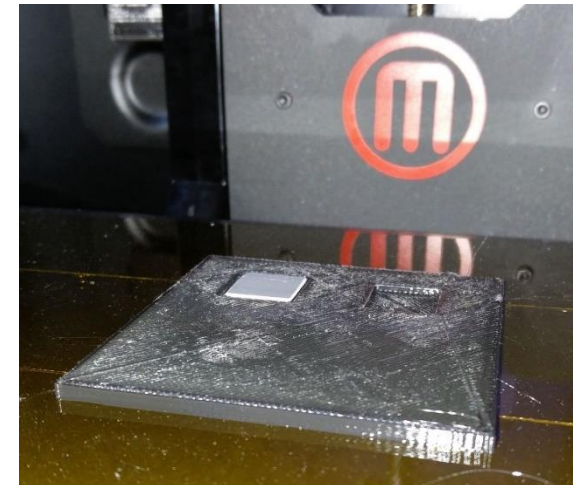
- Induktiv Thermografie mit Ringspule und Helmholtz-Spule
- Blitzthermografie in Transmission und Reflexion

➤ Zusammenfassung

- Druck aus Polylactide (PLA)
- Druckvorgang gestoppt und Metallplättchen eingelegt
- Unterschiedliche Metalle: Aluminium, Kupfer, Stahl



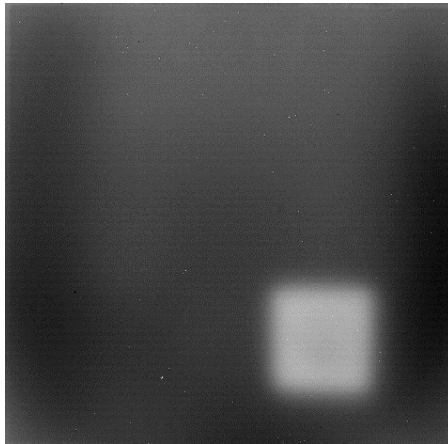
*Position der Inlays*



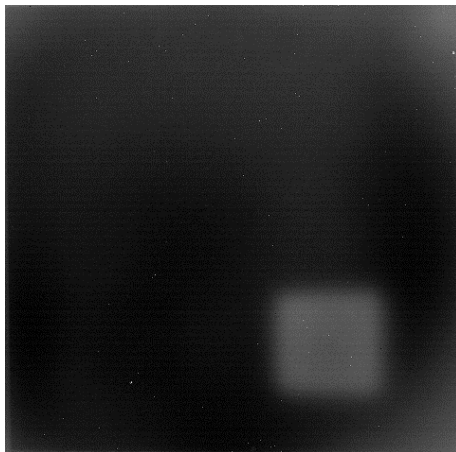
*Einsetzen metallische Inlays während des 3D-Druckes*



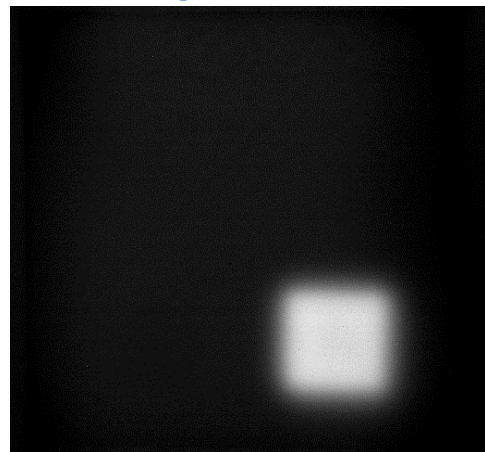
*Vorderansicht*



*Aluminium nach 20 Sekunden*



*Kupfer nach 20 Sekunden*

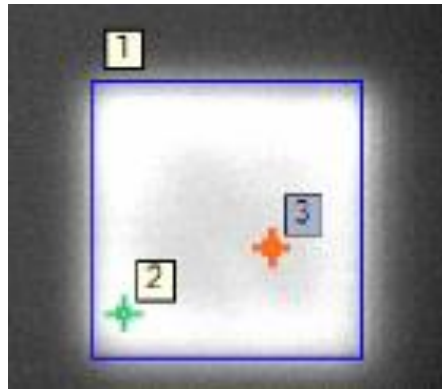


*Stahl nach 10 Sekunden*

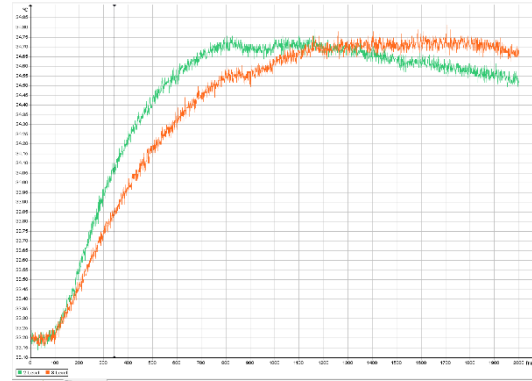
- Mittels Induktivthermografie können metallische Inlays erwärmt werden.
- Je nach magnetischen Eigenschaften der Metalle sieht man bereits im Thermogramm große Unterschiede
- Durch weitere Auswertung kann auch die Haftung zwischen Inlay und dem Trägermaterial untersucht werden.

*Thermogramme der Proben mit Pulsdauern von 2 Sekunden (Al,Cu) bzw. 0.3 Sekunden(St)*

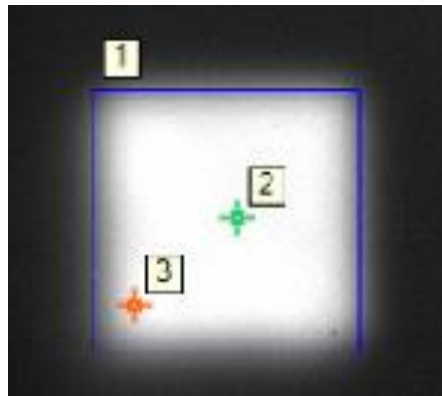




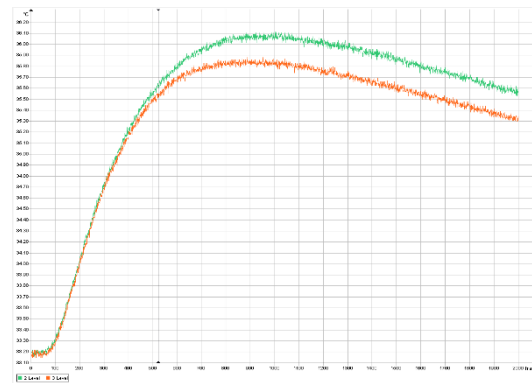
*Temperaturbild auf der Vorderseite der Probe mit Stahl*



- Auf Vorderseite durch Druckvorgang leichte Lufteinschlüsse  
→ Temperatur in der Mitte des Inlays gelangt später an die Oberfläche



*Temperaturbild auf der Rückseite der Probe mit Stahl*

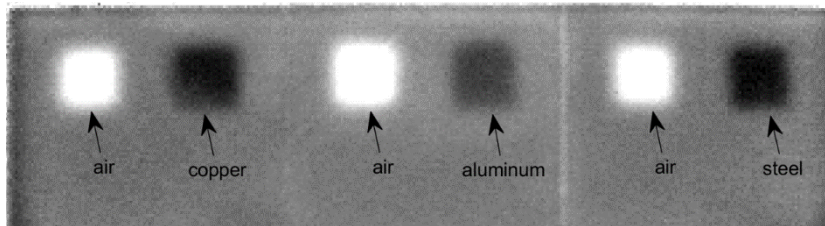


- Auf Rückseite besserer Kontakt zwischen Inlay und PLA-Filament  
→ gleichmäßiger Temperaturanstieg
- Fazit: Sogar kleine Lufteinschlüsse können sichtbar gemacht werden

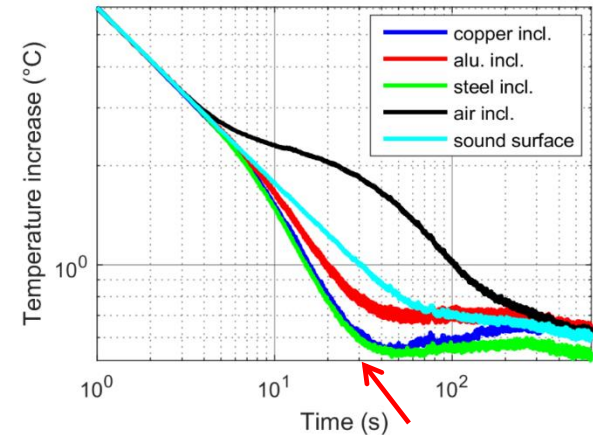




3 Proben mit verschiedenen Inlays  
(Kupfer, Aluminium, Stahl)



Temperatur auf der Rückseite der Proben  
30 Sekunden nach dem Blitz



Teperatur-Zeit-Diagramm der  
verschiedenen Inlays

- Die Inlays sind sehr gut zu erkennen und zeigen unterschiedliche Temperaturen durch unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten und Wärmekapazität
- Der Lufteinschluss unterscheidet sich stark von den Metall-Inlays (Lufteinschluss → Barriere für Wärmefluss  
Metalleinlage → leiten die Wärme schneller ab → kühlere Oberfläche)

## ➤ Blitzthermografie

- Es können metallische und nichtmetallische Einschlüsse bzw. Inlays detektiert werden, wenn sich ihre Temperaturleitfähigkeit vom Grundmaterial unterscheidet
- Aufgrund der unterschiedlichen thermischen Eigenschaften können Werkstoffe aufgrund des Temperaturverlaufes unterschieden werden
- Ist der Wärmeleitwert bekannt, können Schichtdicken bestimmt werden

## ➤ Induktivthermografie

- Metallische Werkstoffe können im COMPOSITE-Werkstoff detektiert und mittels Temperaturkurven unterschieden werden

## ➤ Präsentation der Verfahren

- Induktiv Thermografie (Aufbau, Verfahren, Auswertung)
- Blitzthermografie ( Aufbau, Verfahren, Auswertung)
- Anwendungsbereiche der beiden Verfahren

## ➤ Vergleich der Verfahren für metallische Bauteile

- Induktiv Thermografie mittels Scanning-Verfahren
- Blitzthermografie in Reflexion

## ➤ Vergleich der Verfahren für COMPOSITE- Bauteile

- Induktiv Thermografie mit Helmholtz-Spule
- Blitzthermografie in Transmission und Reflexion

## ➤ Vergleich der Verfahren für CFK- Bauteile

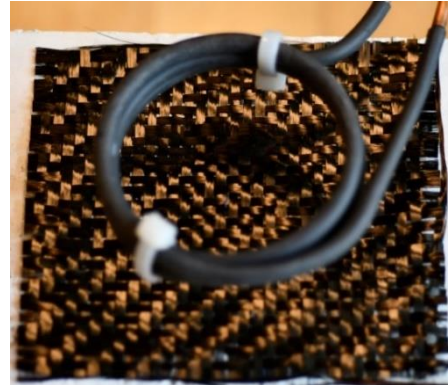
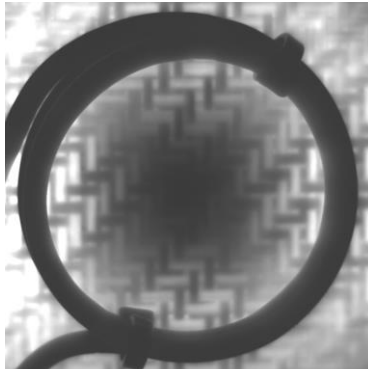
- Induktiv Thermografie mit Ringspule und Helmholtz-Spule
- Blitzthermografie in Transmission und Reflexion

## ➤ Zusammenfassung

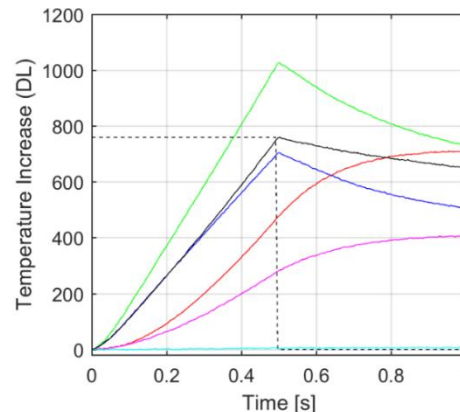
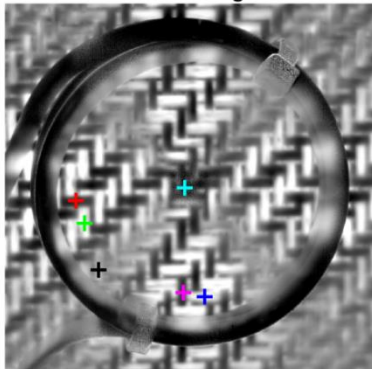


- Nur eine Schicht gewobener Karbonfasern ohne Harz
- Wirbelstrom kann auch in Karbonfasern induziert werden  
→ induktives Testen von Karbonfasern ist möglich

Temperature



Phase image



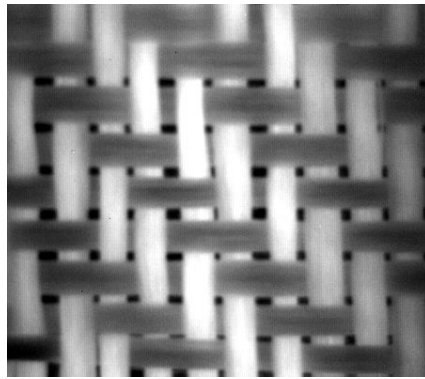
*Erwärmung eines Fasergetflechts unter einer Ringspule*

- Geometrie der Ringspule wird auf Fasergeflecht „gespiegelt“
- Wirbelstrom fließt in jenen Fasern tangential zur Spule  
→ direkte Erwärmung
- Fasern radial zur Spule werden durch Wärmediffusion an den Faserkreuzungen erwärmt  
→ indirekte Erwärmung
- Keine Erwärmung im Zentrum

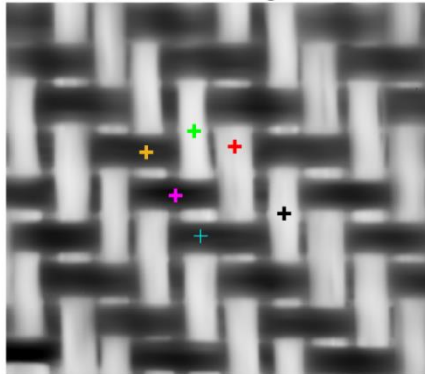


- Nur eine Schicht gewobener Karbonfasern ohne Harz

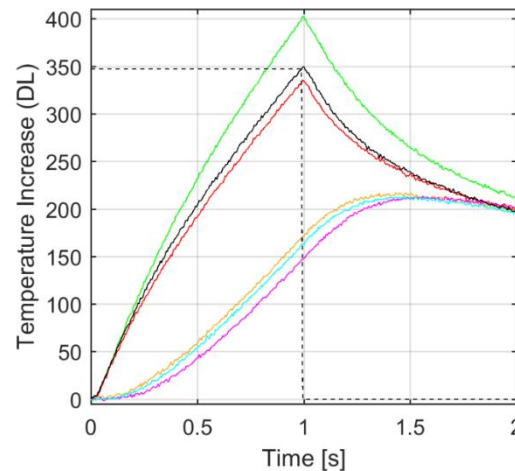
Temperature



Phase image

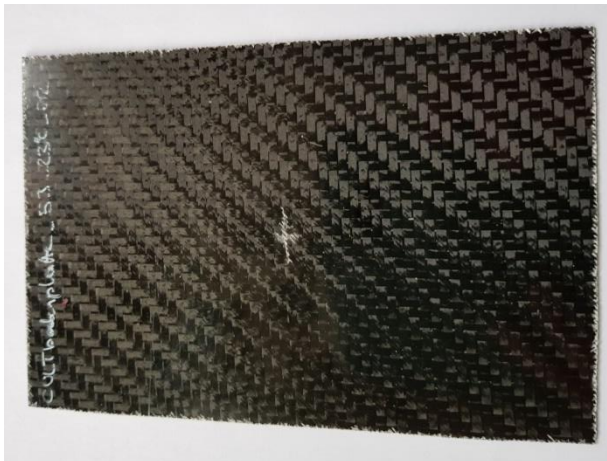


- Fasern parallel zur Spule → direkte Erwärmung
- Fasern quer zur Spule → indirekte Erwärmung
- Homogenes Feld im mittleren Bereich der Spule



## *Temperaturänderung in Fasergeflecht*

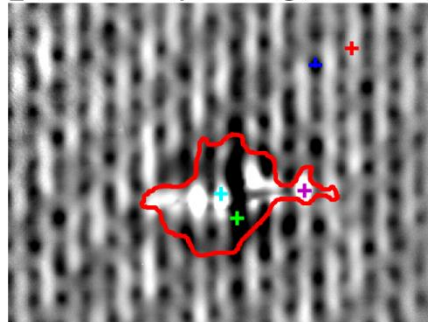
- Verwobene Karbonfasern ( Ausrichtung:  $0^{\circ}/90^{\circ}$  )
- 3 aufeinander liegende Schichten ( mittlere um  $45^{\circ}$  gedreht )
- Verklebt mit Epoxidharz ( mittels Vakuuminfusion )
- Größe: 150 mm x 100 mm; Dicke: 0.8 mm
- Impact-Schäden ( 1J - 5J ) erzeugt durch Schlagversuch



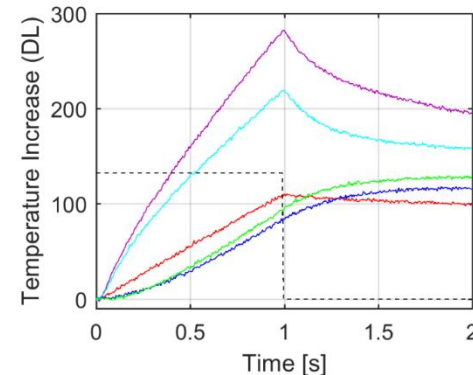
*Vorder- und Rückseite einer CFK-Probe*

- Bei Fehlerstelle – größere Temperaturerhöhung – höherer Phasenwert
- Temperaturerhöhung hängt von Position des Fehlers in der Spule ab

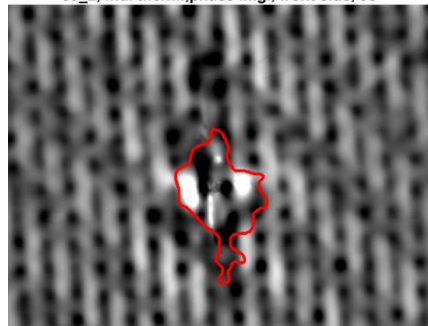
5J\_2, ind. therm., phase img., front side, 0°



*Vorderseite, 0°*

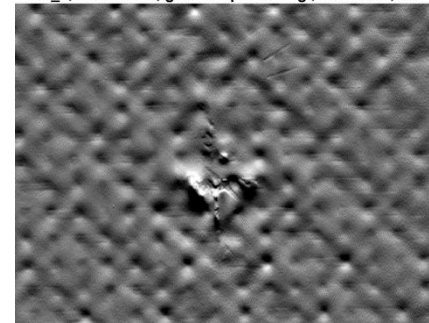


5J\_2, ind. therm., phase img., front side, 90°



*Vorderseite, 90°*

5J\_2, ind. therm., gradient phase img., front side, 90°

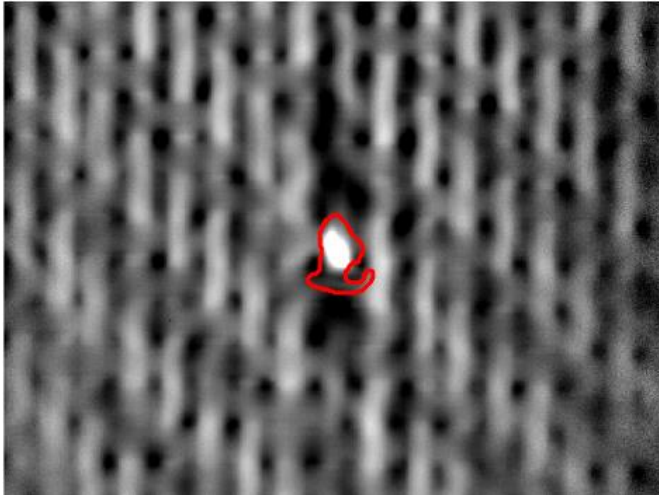


*Phasenbilder der Impactprobe 5J\_2 (li.o., li.u.);  
Temperaturkurve (re.o.); Gradientenbild in y-Richtung (re.u.)*



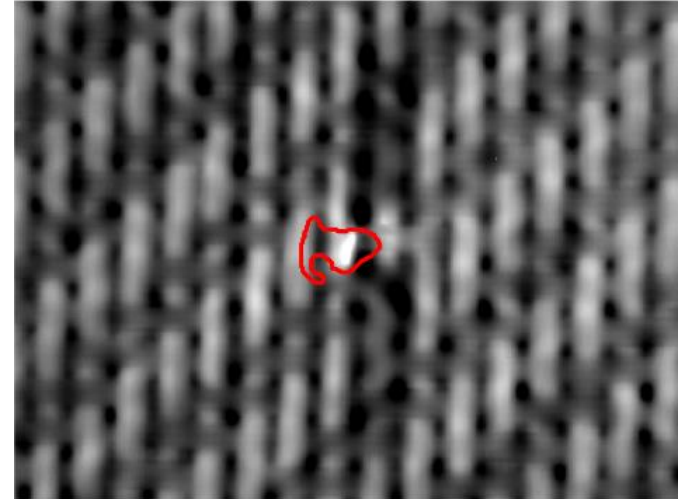
- Impactschaden auf Rückseite der Probe mittels induktiver Erwärmung gut zu erkennen

3J\_3, ind. therm., phase img., rear side, 0°



*Phasenbild der Impactprobe 3J\_3  
Rückseite 0°*

3J\_3, ind. therm., phase img., rear side, 90°

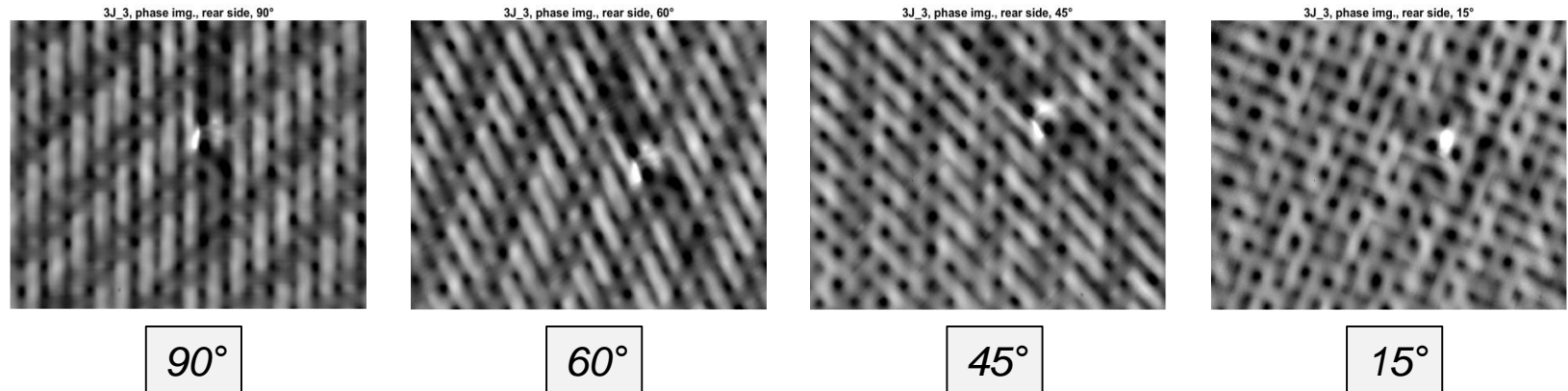


*Phasenbild der Impactprobe 3J\_3  
Rückseite 90°*

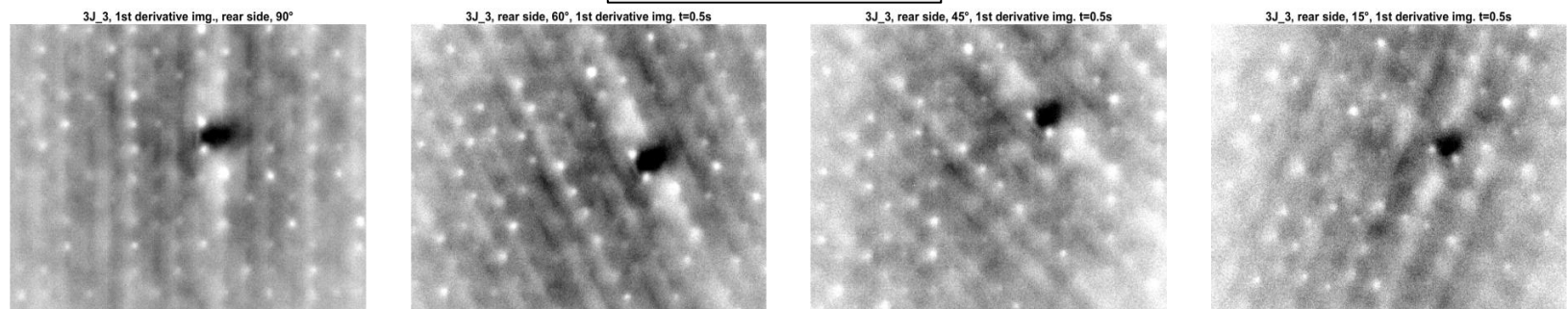


- Fehler ist je nach Orientierung in der Spule gut oder weniger gut zu sehen
- Für diesen Fehlertyp eignet sich auch die 1. Ableitung zur Fehlerdetektion

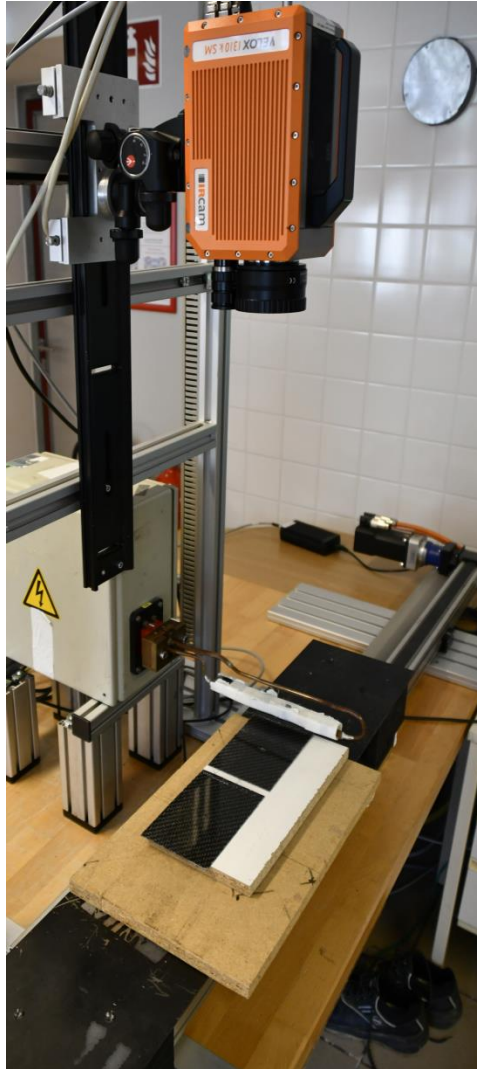
## Phasenbilder



## 1. Ableitungen

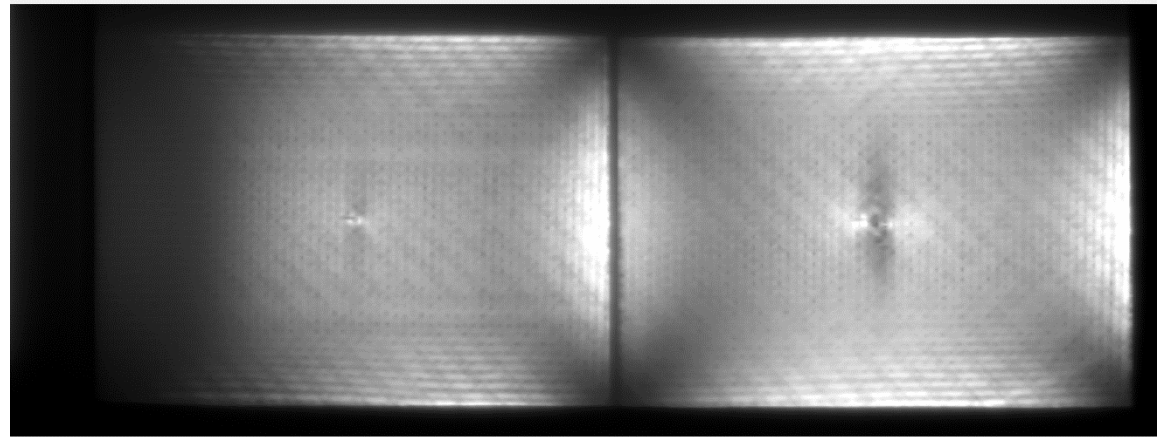


*Probe 3J\_3: Jedes Bild zeigt einen Aufnahmebereich von 30 x 40 mm<sup>2</sup>*



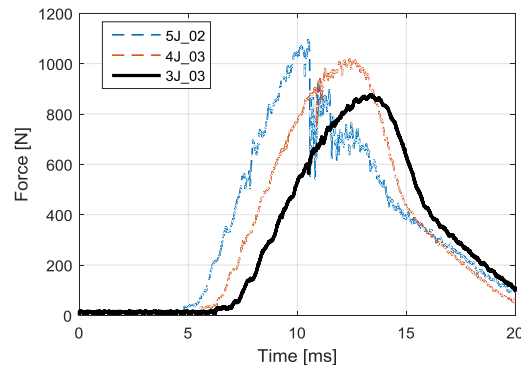
*Versuchsaufbau*

- Zwei unterschiedlich beschädigte CFK-Proben wurden mittels Scanning – Verfahren induktiv bei einer Geschwindigkeit von 15 cm/s gemessen

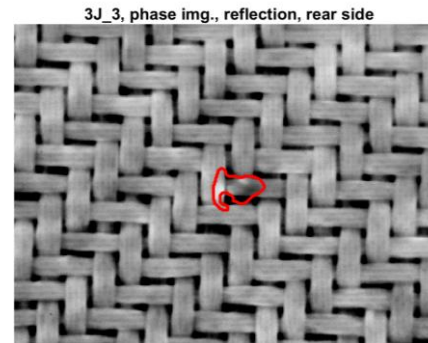


*Berechnetes Temperaturbild bei 15cm/s*

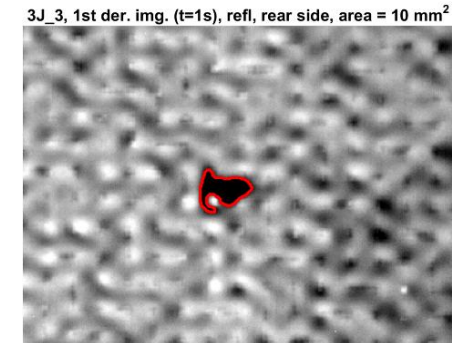




*Kraft-Zeit-Diagramm der  
Impact-Schäden*



*Phasenbild 3J\_3  
Rückseite*



*1.Ableitung 3J\_3  
Rückseite*

- Optisch ist der Fehler auf keiner Seite sichtbar
- Blitzmessung in Transmission → Fehler ebenfalls nicht sichtbar
- Blitzmessung in Reflexion; Rückseite:
  - Bild der 1. Ableitung: Fehler ist sichtbar
  - Phasenbild: Fehler ist schwach sichtbar

- Die Induktivthermografie zeigt sehr gut, welche Fasern beschädigt wurden, auch wenn dies optisch nicht sichtbar ist.
- Die Blitzthermografie zeigt die Delaminationen im Faserverbund, welche durch den Schlagversuch erzeugt wurden



## Induktivthermografie

kann nur für elektrisch leitende Materialien verwendet werden.

die Erwärmung selbst hängt nicht von Oberflächeneigenschaften ab (Joule Wärme entsteht in Material).

kann auch Materialien, wie z.B. Metalle mit speziellen magnetischen Eigenschaften sehr effektiv erwärmen.

ist sehr gut zur Detektion von Fehlern wie z.B. Oberflächenrissen und Faserschäden (in Karbonfaser), da Fehler lokal stärker erwärmt werden.

Auch lange Teile können mittels Scanning-Verfahren geprüft werden.

## Blitzthermografie

kann auch für elektrisch nicht leitende Materialien (z.B. Kunststoff) eingesetzt werden.

Die Erwärmung/ die Absorption des Lichtes hängt von der Absorptionsfähigkeit der Oberfläche ab

Metalle sind oft glänzend → geringe Absorption und deshalb geringe Erwärmung

Es wird die Oberfläche erwärmt, man detektiert den Einfluss auf den Wärmefluss

Zur Aufnahme größerer Bauteile müssen einzelne Bilder zusammengestellt werden

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des COMET-Programms im K2 Zentrum „Integrated Computational Material, Process and Product Engineering (IC-MPPE)“ (Projektnummer 859480). Dieses Programm wird von den österreichischen Bundesministerien für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) und für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort (BMDW), vertreten durch die österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG), und den Bundesländern Steiermark, Oberösterreich und Tirol gefördert.

