
Kombinierte Inspektion von Faserverbundwerkstoffen mit Computertomographie und Thermographie

Control Eventforum 2013

Ira Effenberger
Simina Fulga

Überblick

- Kurze Einführung
- 3D-Struktur- und- Defektanalyse auf Basis von CT-Daten
- Analyseergebnisse
- 3D-Porositätsanalyse in CT-Daten
- Analyseergebnisse
- Entwicklung des Thermografie-Gesamtsystems
- Datenauswertung auf Basis von Thermografiebildern
- Anwendungskatalog für Faserverbundbauteile:
Ergebnisvergleich Thermografie und CT
- Zusammenfassung

Einführung

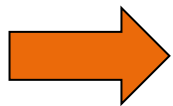
Faserverbundwerkstoffe

- Bekannte Faser-Kunststoff-Verbunde:
 - Kohlefaserverstärkte Kunststoffe (CFK)
 - Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK)
 - Günstige Eigenschaften:
 - hohe Steifigkeit und Festigkeit
 - geringe Dichte / geringes Gewicht
- Teilweise hohe Sicherheitsanforderungen bzgl. der Belastbarkeit.

Einführung

Anforderungen an die Qualitätskontrolle

- Zerstörungsfreie qualitative und quantitative Prüfung
- Frühe und zuverlässige Erkennung von Defekten
- Untersuchung innerer Strukturen, z.B. Faserverteilung
- Einsatz der Prüftechnologie möglichst auch im Prozess



Kombinierte Inspektion von Faserverbundwerkstoffen mit Computertomographie und Thermographie

Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des vom BMBF geförderten Projekts FaserInspekt erzielt

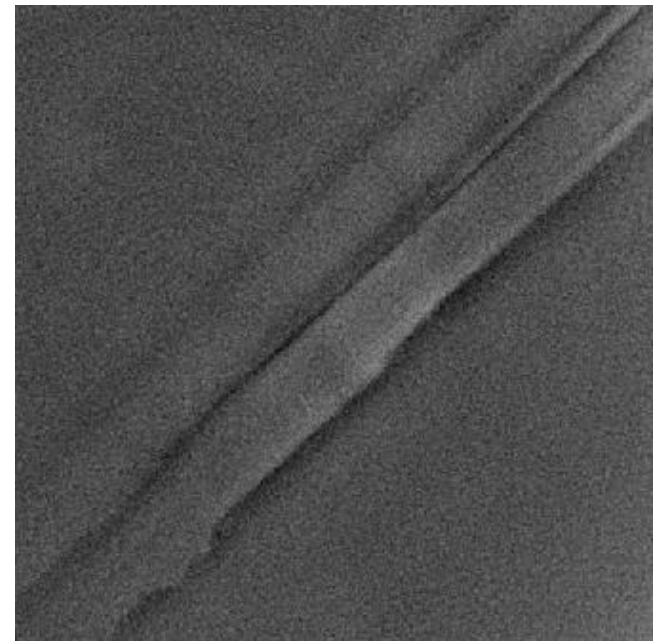
Computertomographie zur Analyse von Faserverbundkunststoffen

- Mittels Computertomographie werden Faserverbundwerkstoffe hochauflösend aufgenommen
- Vorteile:
 - innere Fehler und innerer Aufbau sichtbar
 - zerstörungsfrei
- Nachteile:
 - zeitintensiv sowohl bei der Aufnahme, wie bei der Analyse

Struktur von Faserverbundkunststoffen

3D-Defektanalyse

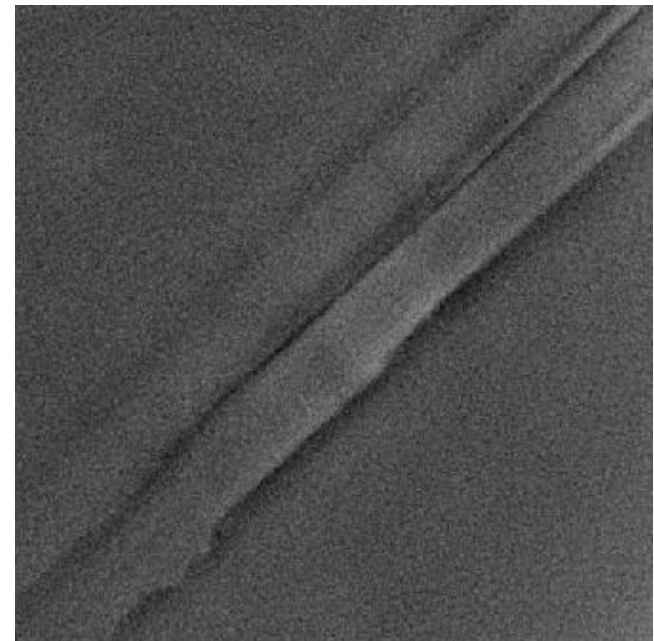
- Fasern und Faserverteilung bilden Grundstruktur
 - Fehler sind Abweichungen von der Grundstruktur
 - Komplexer dreidimensionaler Aufbau erfordert 3D-Analyse
- ⇒ Entwicklung einer 3D-Defektanalysesoftware



Merkmale

3D-Defektanalyse

- Empfindlichkeit wird über Parameterwahl eingestellt
- Fehlbereiche werden farblich markiert
- Analyseergebnis wird als Volumendatensatz gespeichert



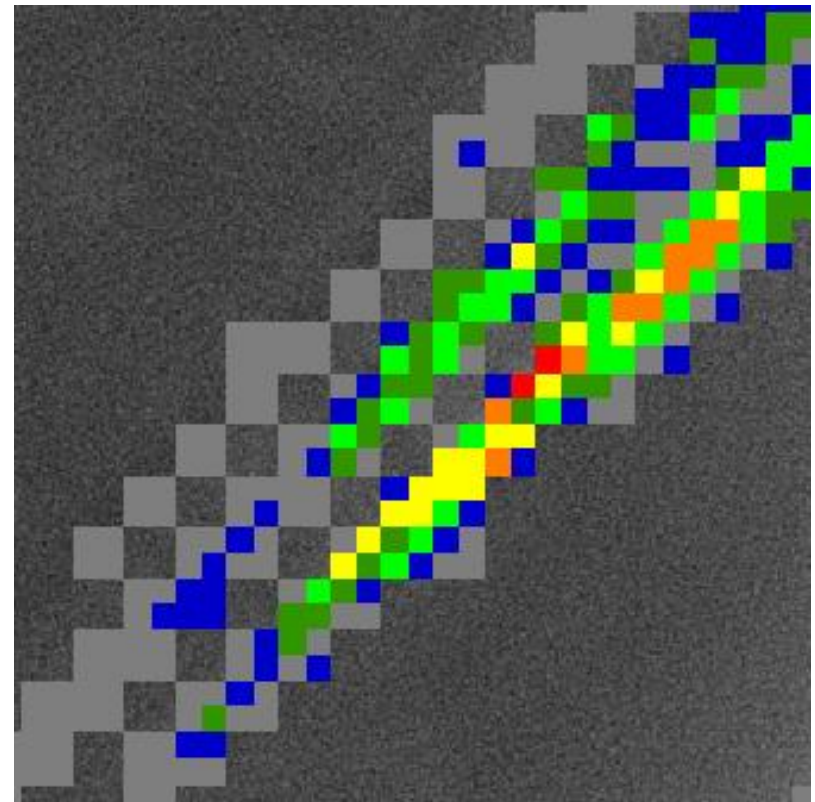
Analyseergebnis

3D-Defektanalyse

Schnitt durch
Volumendatensatz



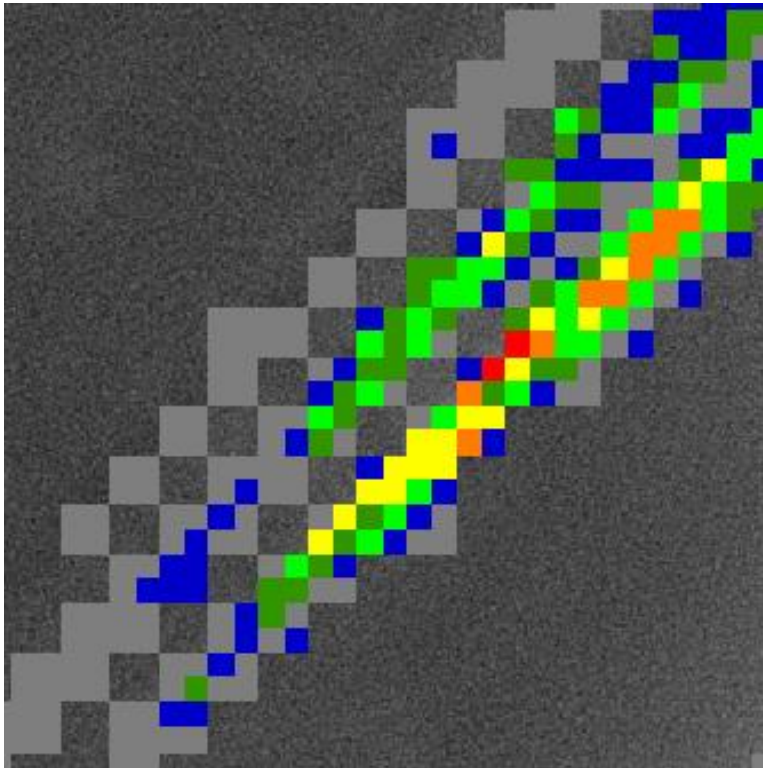
Schnitt durch analysierten
Volumendatensatz



Analyseergebnis

3D-Defektanalyse

Defektanalyse



Maß der Heterogenität von
schwach nach stark



Vorteile

3D-Defektanalyse

- Fehler werden automatisch gefunden
- Eindeutige Visualisierung von Fehlbereichen
- Bestimmung der Fehlergröße und Ausrichtung

Faserorientierung

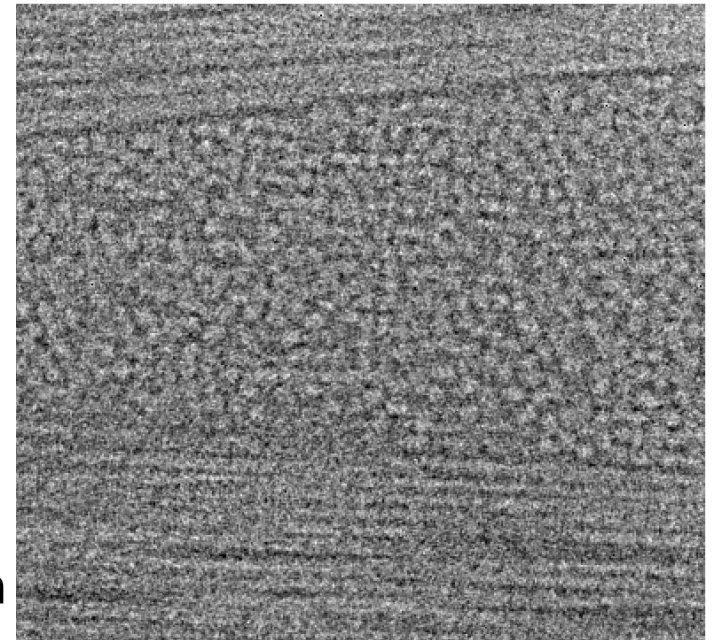
3D-Faserorientierungsanalyse

Ausrichtung der Fasern:

- wichtig für Stabilität
 - wichtig für Steifigkeit
- ⇒ Faserorientierung entscheidendes Qualitätsmerkmal

Adaption der 3D-Defektanalysesoftware zur Faserorientierungsanalysesoftware:

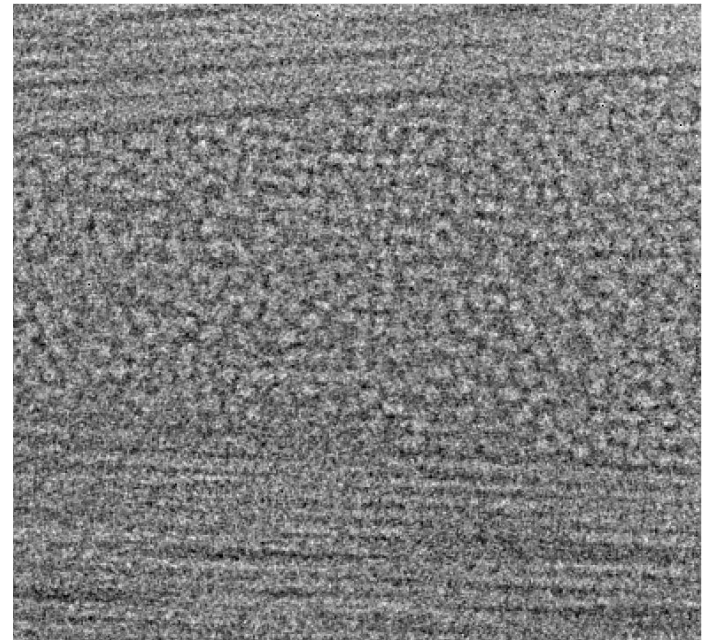
- Auffinden der Strukturen
- ignorieren von lokalen Abweichungen



Merkmale

3D-Faserorientierungsanalyse

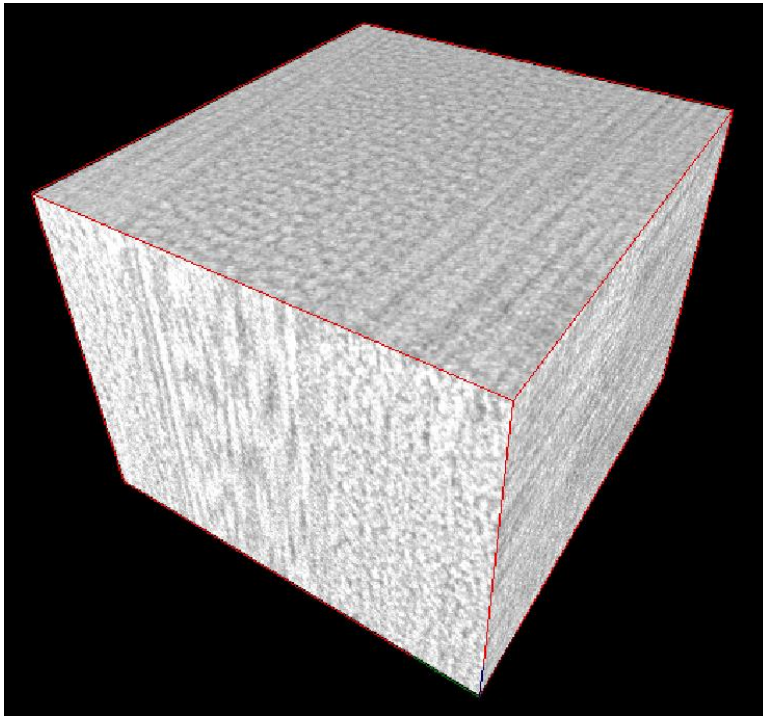
- Parameter bestimmt Trennung der Fasern
- Faserorientierung wird farblich markiert
- Analyseergebnis wird als Volumendatensatz gespeichert



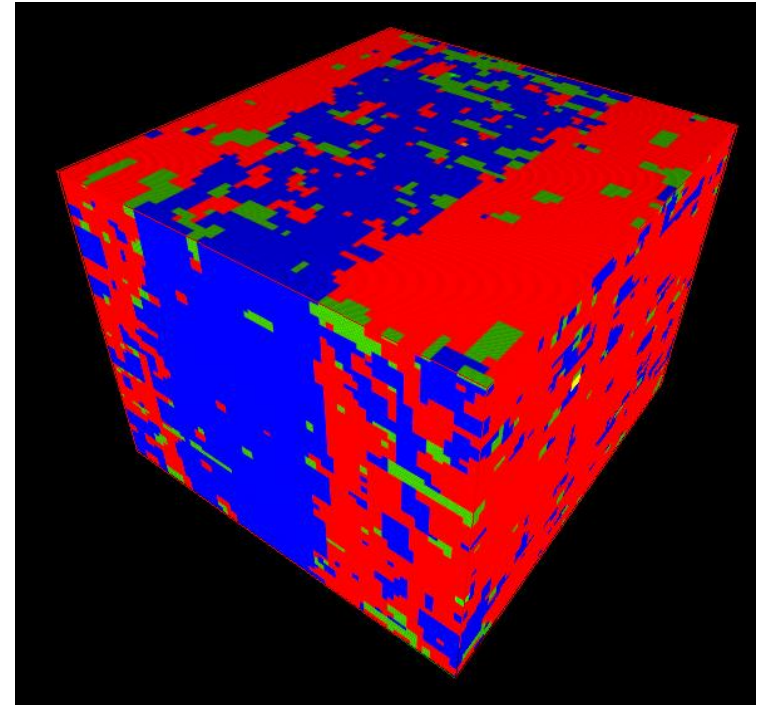
Analyseergebnis

3D-Faserorientierungsanalyse

Volumendatensatz



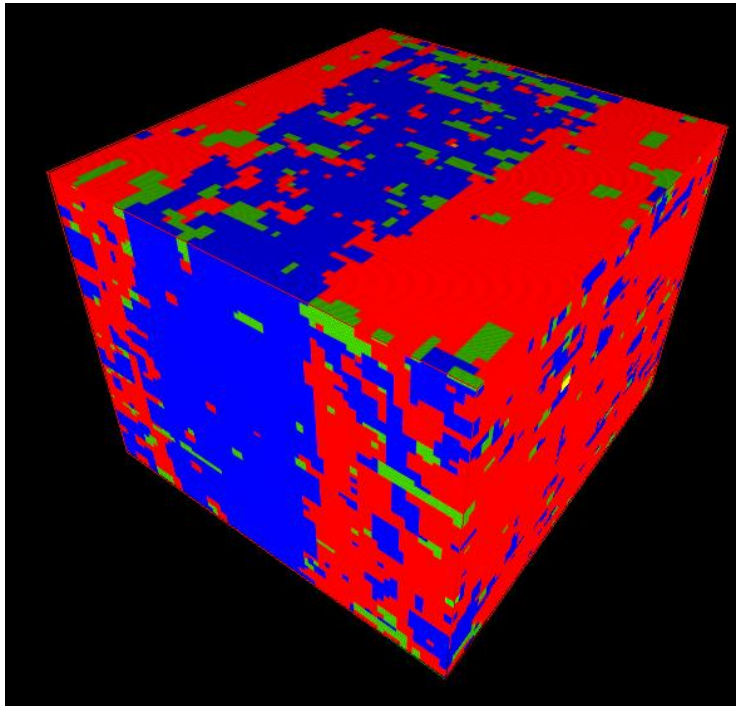
Analysierte Faserorientierung



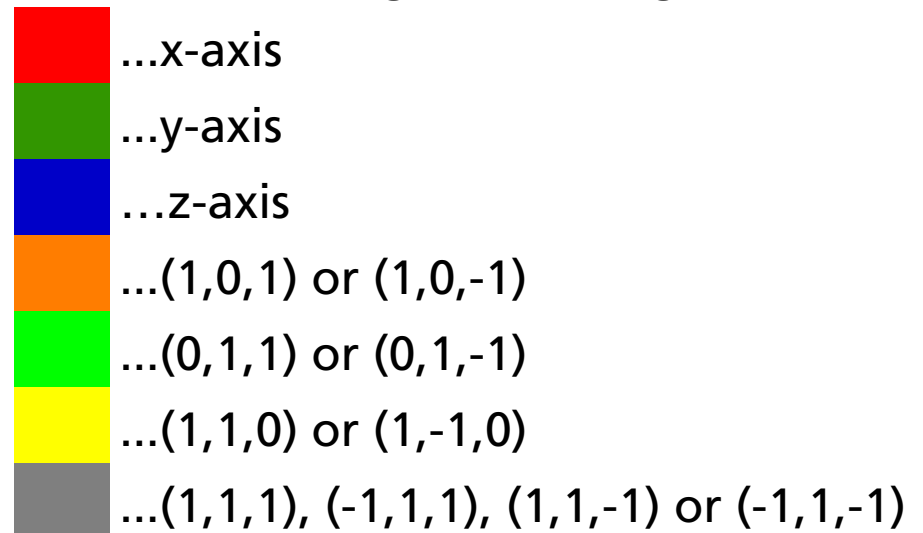
Analyseergebnis

3D-Faserorientierungsanalyse

Analysierte Faserorientierung



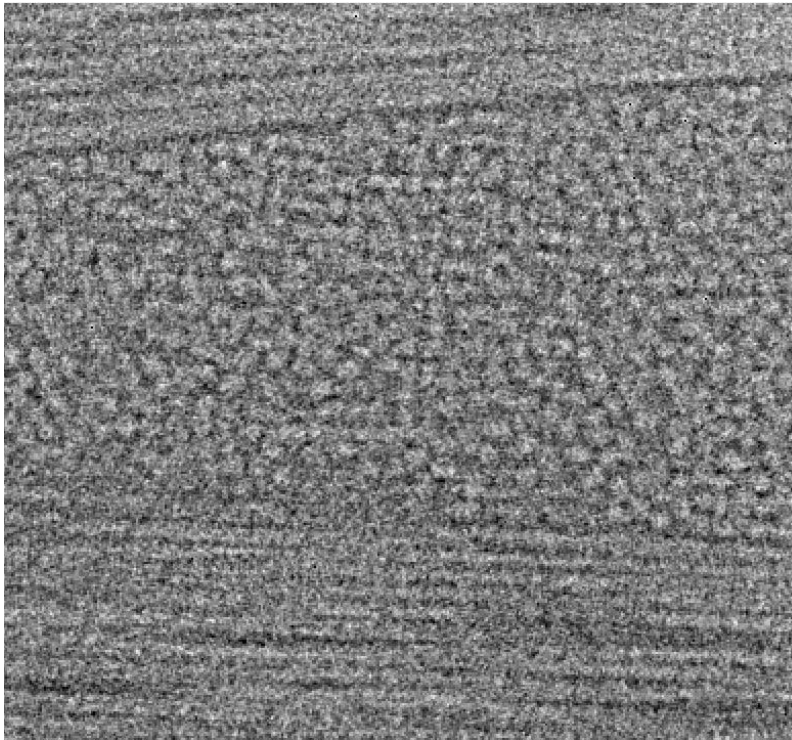
Orientierung in Richtung ...



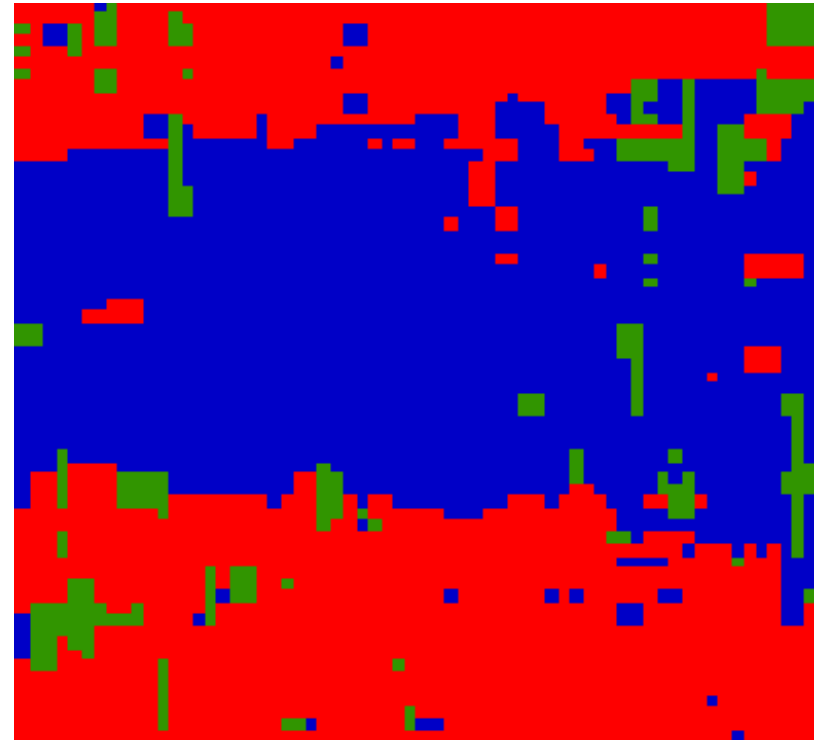
Analyseergebnis

3D-Faserorientierungsanalyse

Schnitt durch
Volumendatensatz



Schnitt durch analysierten
Volumendatensatz



Vorteile

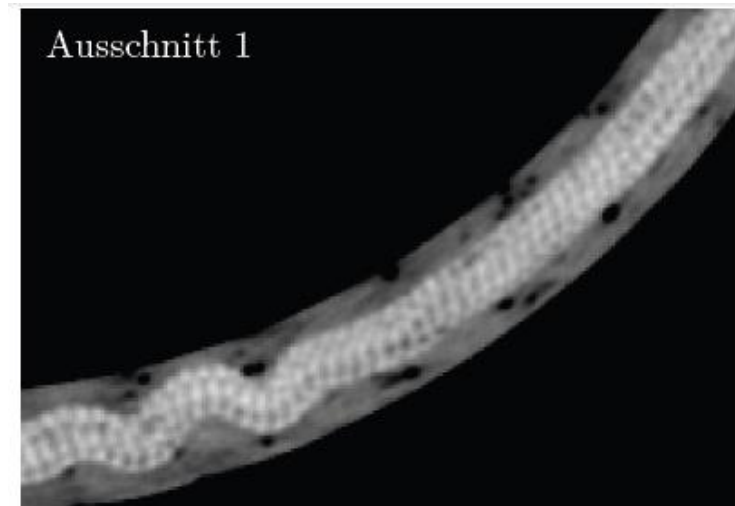
3D-Faserorientierungsanalyse

- Faserorientierung wird automatisch erkannt
- Faserschichten können segmentiert werden, dadurch Aussagen über Schichtdicke und Lagenaufbau möglich
- statistische Auswertung über Anzahl und Verteilung der Fasern

Poren von Faserverbundkunststoffen

3D-Porositätsanalyse

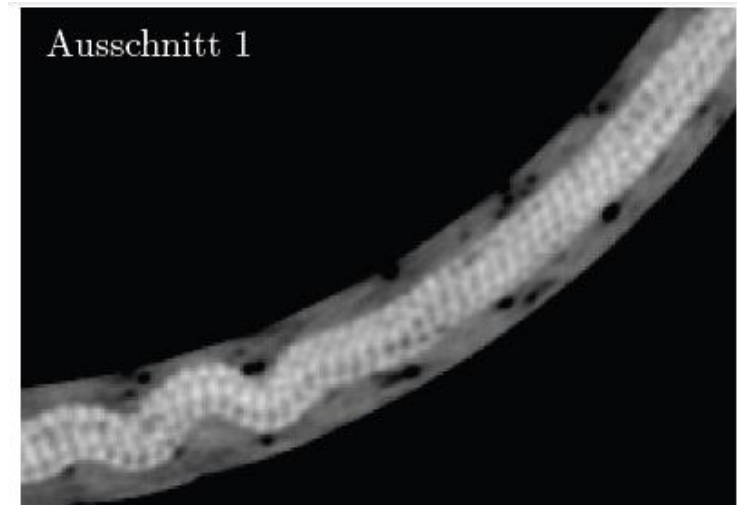
- Komplexe Zusammensetzung aus Fasern und Harz erschwert automatisiertes Auffinden aller Poren
 - Keine Standardlösung speziell für Faserverbundkunststoffe am Markt
- ⇒ Entwicklung einer adaptiven 3D-Porositätsanalyse für Faserverbundkunststoffe



Merkmale

3D-Porositätsanalyse

- Lokale Untersuchung statt globaler Schwellwert
- Manuelle Korrekturmöglichkeit
- Nutzerfreundlichkeit der Parameterbestimmung
- Preview Fenster

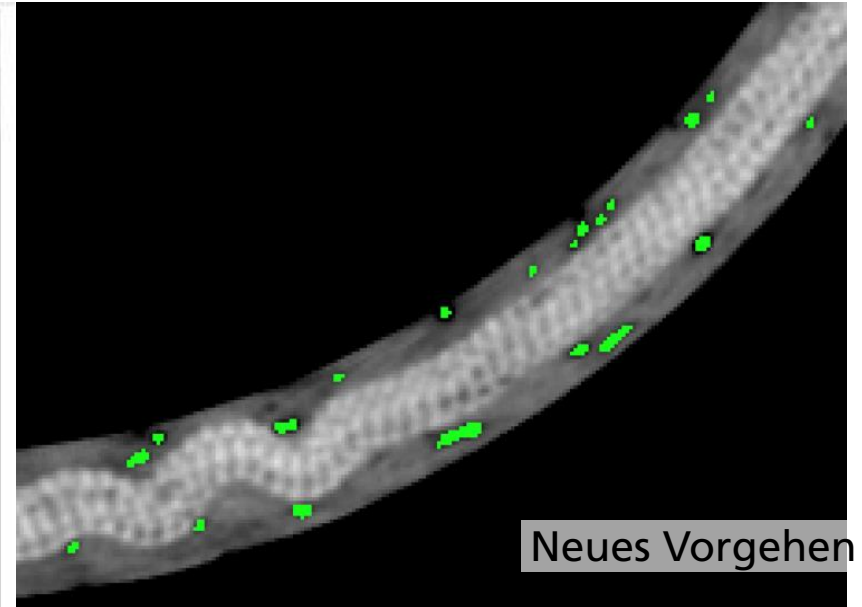


Analyseergebnis

3D-Porositätsanalyse

Schnitt durch
Volumendatensatz

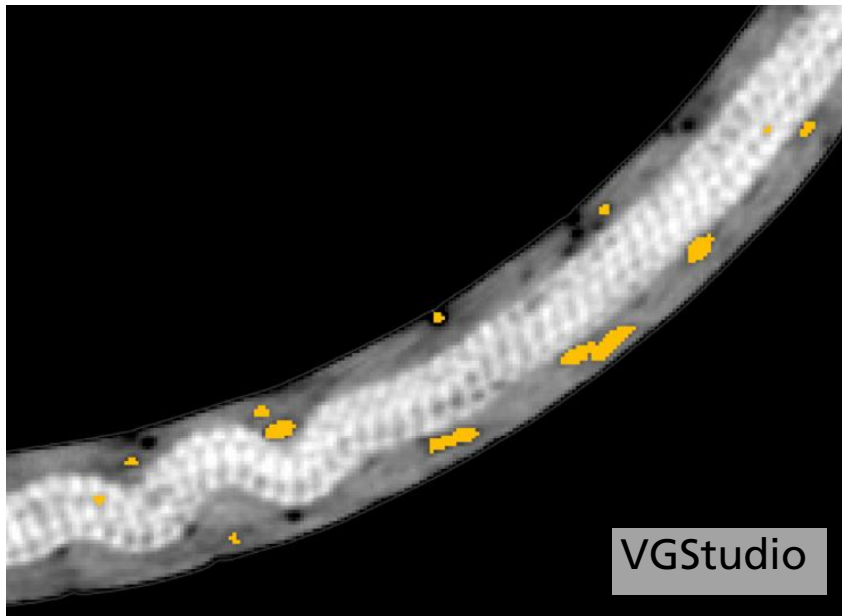
Schnitt durch analysierten
Volumendatensatz



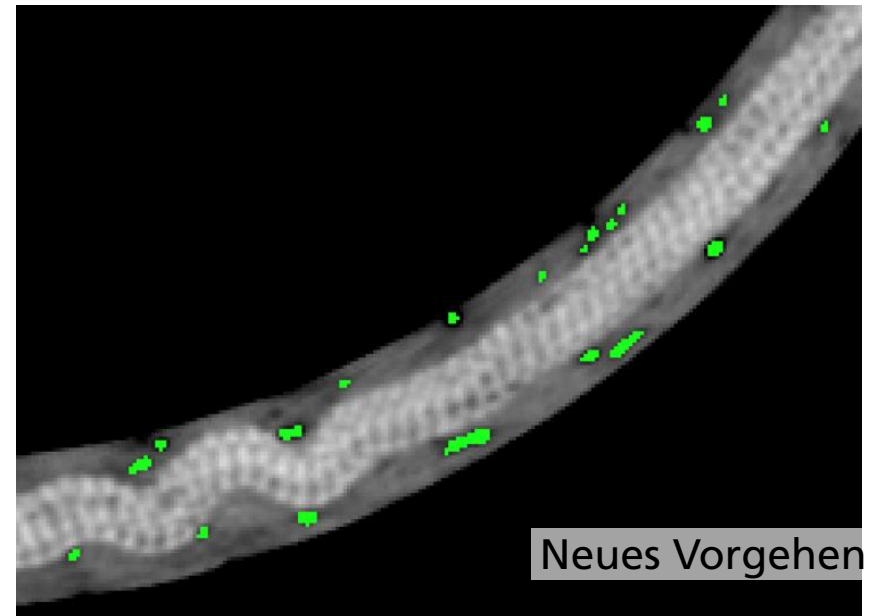
Vergleich mit VGStudio

3D-Porositätsanalyse

Schnitt durch
Analyseergebnis mit VGStudio



Schnitt durch analysierten
Volumendatensatz



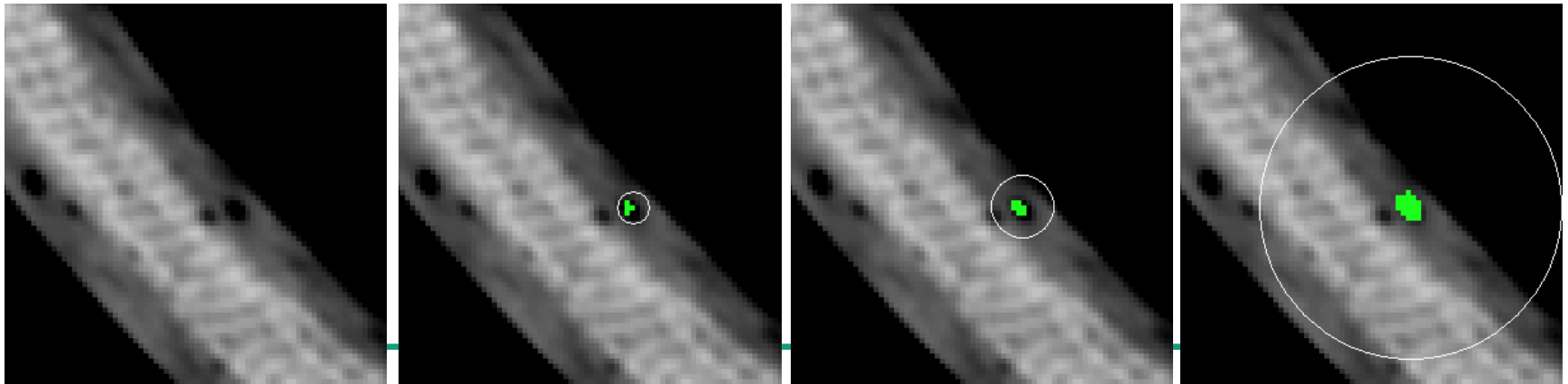
Manuelle Korrektur

3D-Porositätsanalyse

Möglichkeit zum manuellen

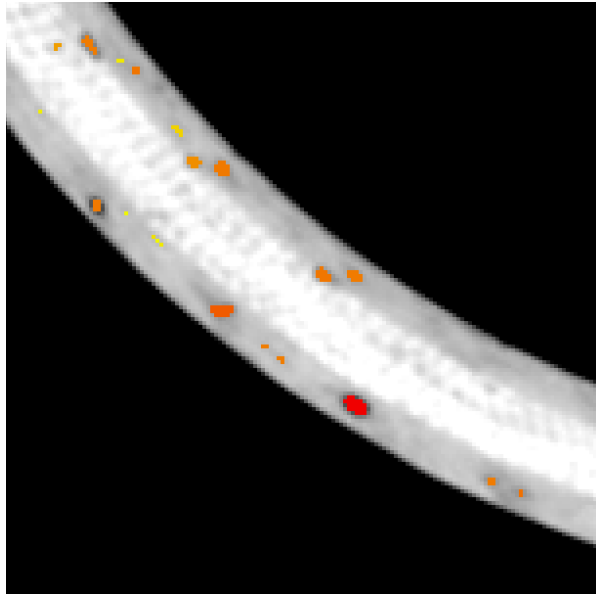
- Einfügen einer Pore durch Mausklick und Ziehen: lokale, automatische Analyse
- Löschen einer Pore durch Mausklick

⇒ Benutzerfreundliche Ergebnisoptimierung mit direktem visuellem Feedback

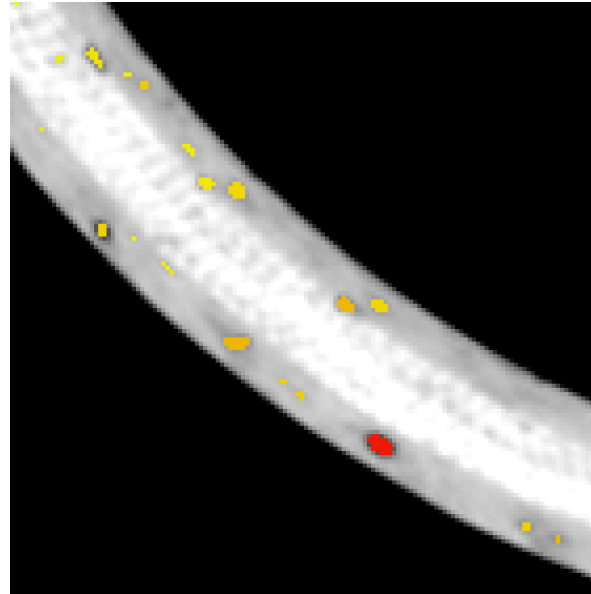


Verschiedene farbkodierte Visualisierungen

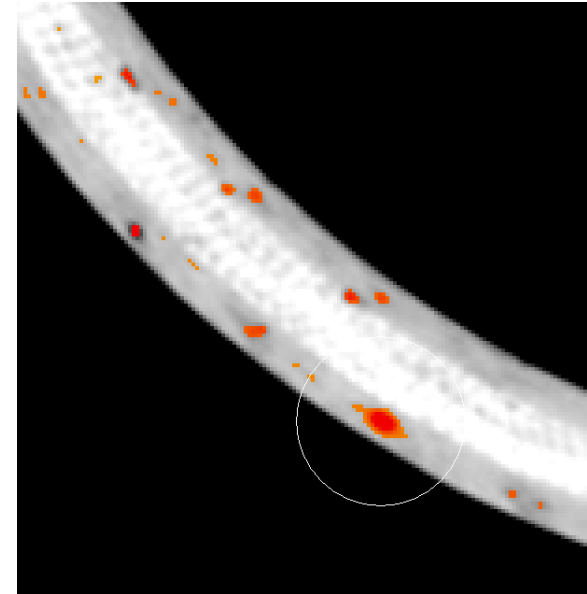
3D-Porositätsanalyse



abhängig vom Volumen
der Pore



abhängig von Porentiefe
über die Voxelschichten



abhängig vom
darunterliegenden
Grauwert

Vorteile

3D-Porositätsanalyse

- Sehr gute Ergebnisse
- Poren werden automatisch gefunden und dargestellt
- Direkte Visualisierung bei Parameteränderung in aktueller Schicht
- Parameter schnell und einfach anpassbar
- Manuelle Nachbearbeitung möglich

Thermografie zur Inspektion von Faserverbundwerkstoffen

- I. Entwicklung des Thermografie Gesamtsystem
- II. Datenauswertung
- III. Anwendungskatalog für Faserverbundbauteile -
Ergebnisvergleich Thermographie und CT
- IV. Zusammenfassung

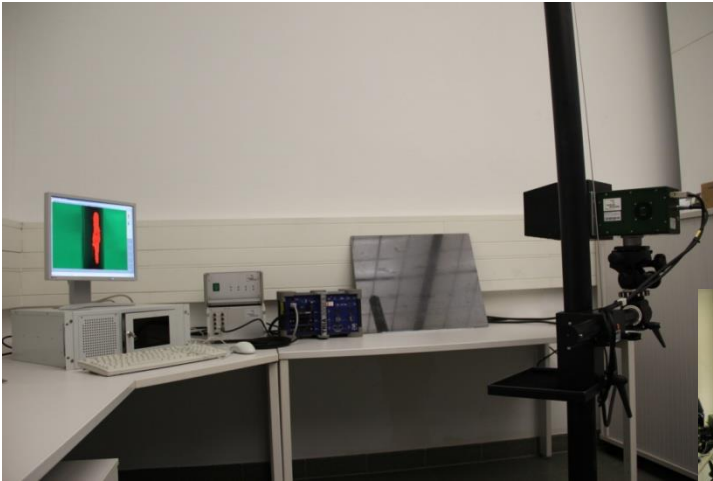
I. Entwicklung des Thermografie Gesamtsystem

- Thermografiesystems
- Geeigneter Thermografieverfahren
- Entwicklung und Optimierung der Datenaufnahme

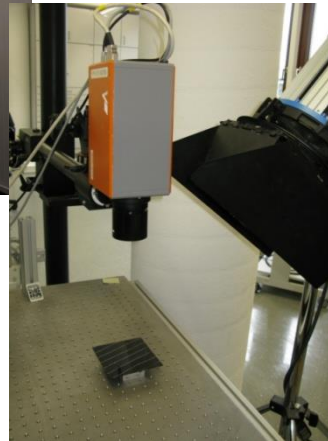
I. Entwicklung des Thermografie Gesamtsystem

Thermographiesystem

- Das IR-Prüfsystem wurde modular aufgebaut, wie folgt :



Thermographiesystem rechts mit Velox 65kM und oben mit CMT 384 M/SM

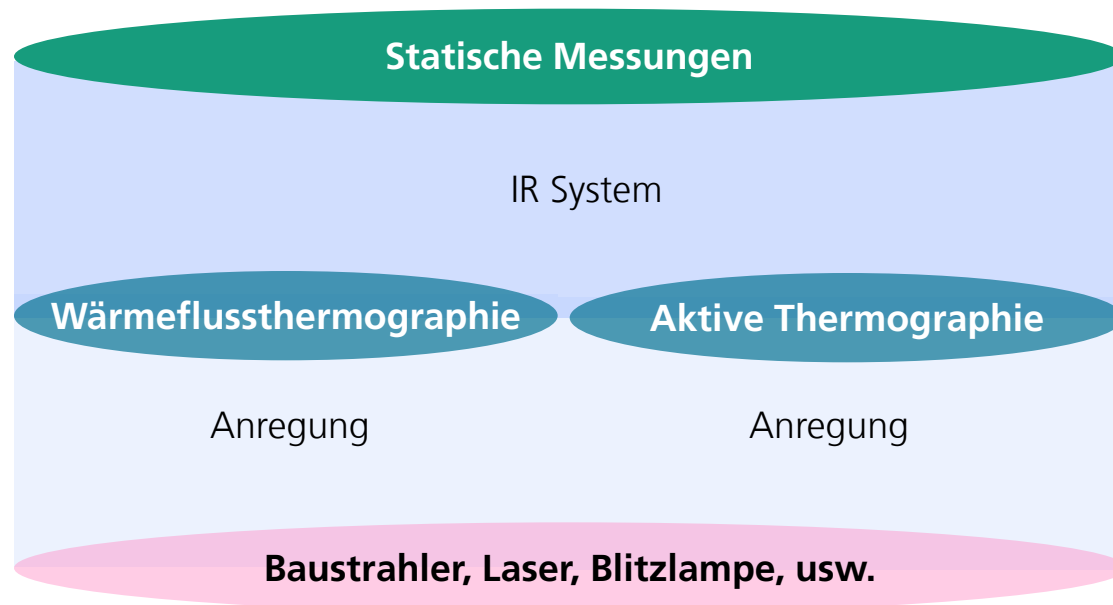


- Zwei IR-Kameras: CMT 384 M/SM Thermosensorik und Velox 65kM Pro von IRCam
- Anregungseinheiten, die modular, abhängig von der Teilegeometrie, angebaut werden können:
 - Blitzlampe
 - Heizstrahler
 - Laser
- PC-System mit nötigen Hardware-Schnittstellen

I. Entwicklung des Thermografie Gesamtsystem

Bestimmung geeigneter Thermografieverfahren

- Nachdem die Testteile zur Verifikation der Hardware definiert wurden und das IR-System aufgebaut wurde, wurden folgende geeignete Verfahren identifiziert:



I. Entwicklung des Thermografie Gesamtsystem

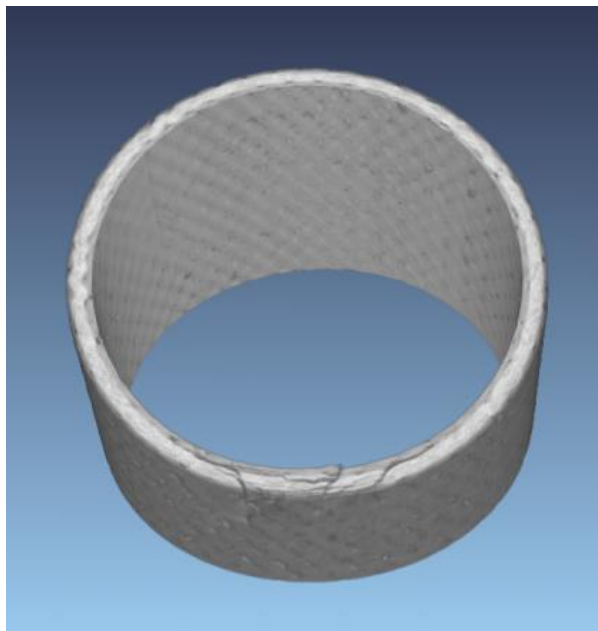
Entwicklung und Optimierung der Thermografie-Datenaufnahme (1/2)

- CT-Daten von definierten Prüflingen wurden als Referenz benutzt wie z.B. Rohre mit verschiedenen Impact-Schäden (5 J, 20 J, 40 J) und CFK-Platten mit Impactschaden
- Verschiedene Anregungseinheiten wurden eingesetzt, um die optimale Datenaufnahme zu gewährleisten
- Die Zwischenergebnisse haben gezeigt, dass eine perfekte, prinzipielle Korrelation zwischen den CT-Daten und den Thermografie-Daten festzustellen ist

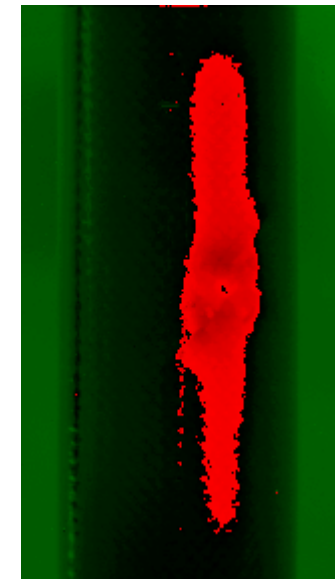
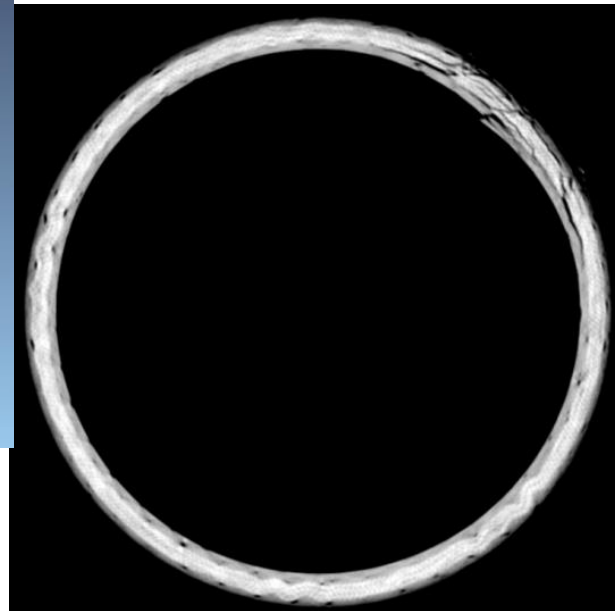
I. Entwicklung des Thermografie Gesamtsystem

Entwicklung und Optimierung der Thermografie-Datenaufnahme (2/2)

- Testteil I: Rohre -> Fehler: Impact-Schaden mit 40 J



CT-Ergebnisbilder



IR-Ergebnisbild
(11 cm)

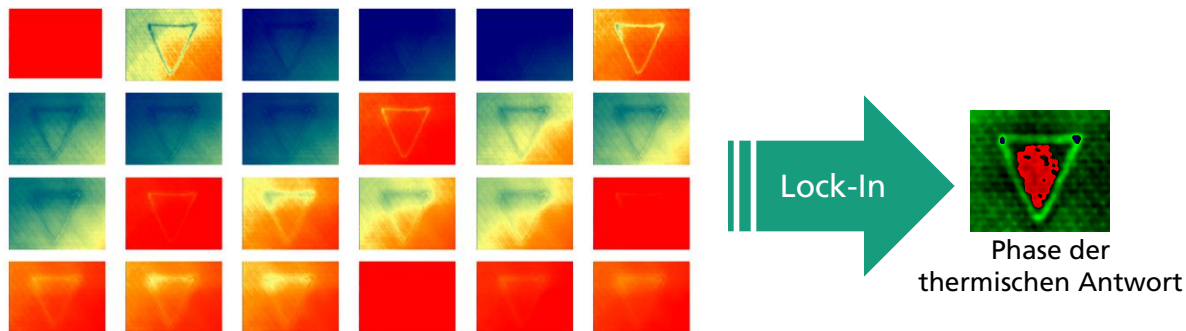
II. Datenauswertung

- Datenauswertung
 - Thermografieauswertung
 - Bildverarbeitung um eine i.O/n.i.O. Information zu erhalten

II. Datenauswertung

Thermografieauswertung

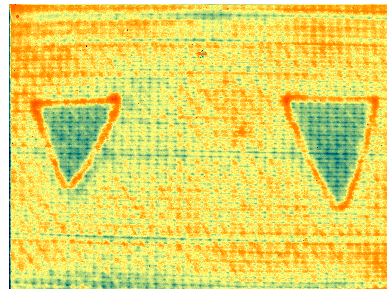
- Lock-In Thermografie zur Steigerung der Messempfindlichkeit
 - Das Prinzip beruht auf der Erfassung einer Temperaturmodulation, die auf der Probenoberfläche erzeugt wird - die induzierte Wärme breitet sich als Welle, die das Raum-Zeit-Verhalten der Temperaturmodulation beschreibt
 - Als sehr empfindliches Auswertverfahren hat sich die Bestimmung der Phasenverschiebung zwischen Energiequelle und der gemessenen thermischen Antwort erwiesen
 - Erfasst man die Temperaturverteilung während der modulierten Wärmeeinbringung bildhaft, so ergibt eine pixelweise Fourieranalyse schließlich Amplitude und Phase der thermischen Antwort.



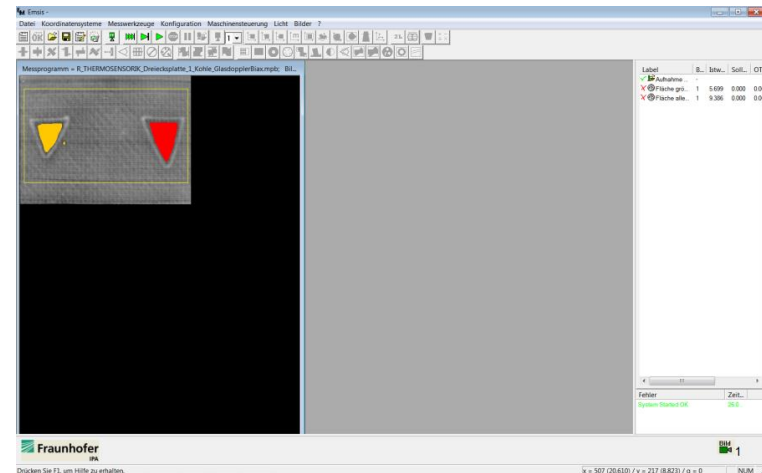
II. Datenauswertung

Bildverarbeitung: i.O./n.i.O.

- Die Ergebnisse der Thermografieauswertungen werden mit verschiedenen Bildverarbeitungsalgorithmen innerhalb der Fraunhofer IPA SW-Plattform EMSIS analysiert, um eine automatische i.O./n.i.O. Information zu erhalten
- Die Fehlerbereiche werden in Ergebnisbild farbig markiert dargestellt



Thermographie Ergebnisbild
Links: Kohledoppler Biax,
Rechts: Glasdoppler Biax



Ergebnis - Bildverarbeitung

III. Anwendungskatalog für Faserverbundwerkstoffe

- Voraussetzung
- Vorgehen
- Anwendungskatalog

Voraussetzung

Anforderungsanalyse Faserverbundwerkstoffe AUDI (1/2)

Anforderungen für CFK/GFK-Teile in der Automobilindustrie durch AUDI

- Aufzählung relevanter Fehler
- Bereitstellung einiger Testbauteile:
 - „Dreiecksplatte“: CFK-Platte mit versch. bekannten Fehlstellen
 - Drei CFK-Rohre mit unterschiedlichen Impactschäden
 - Vier CFK-Platten mit starken Impactschäden
 - „Fadenplatte“: Platte mit sichtbaren Fäden in verschiedenen Tiefen
- Bereitstellung von Datensätzen (vorwiegend für Softwareentwicklungen)

Voraussetzung

Anforderungsanalyse Faserverbundwerkstoffe AUDI (2/2)

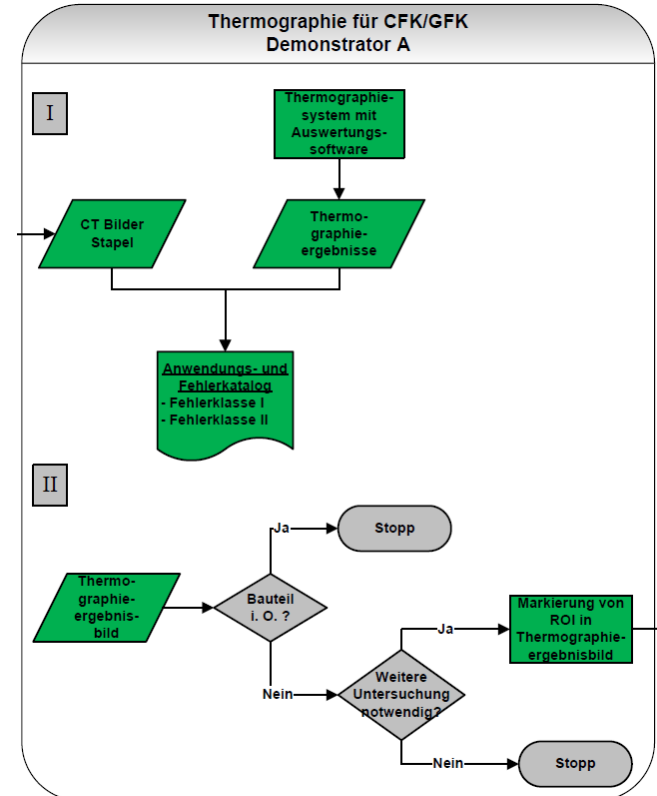
Identifizierte, zu untersuchende Fehlergruppen/-arten:

1. Fehlende Strukturen/ Einschlüsse
2. Identifikation nicht benetzter Stellen
3. Erkennung von Einschnitten
4. Impactschäden bei zylindrischer und bei planarer Form
5. Erkennung von Fäden der Trägerstruktur
6. Poren, Lunken, Löcher
7. Ondulation
8. Trockenstelle
9. Harzüberschuss bzw. Materialüberschuss

Vorgehen

Thermographie und CT im Vergleich

- Unabhängige Datenerfassung der Testbauteile bzw. Fehlstellen mit Thermographie und CT
- Auswertung der CT-Daten zur Nutzung als Referenzen für Thermographiebilder: Fehlernachweis, Fehlerausbreitung, u.v.
- Thermographieauswertung und anschließender Datenvergleich
- Ableitung der Eignung und Grenzen der Thermographie für jede Fehlerart.

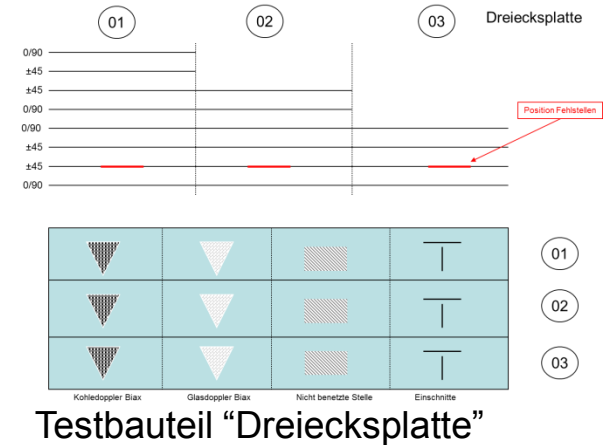


Anwendungskatalog

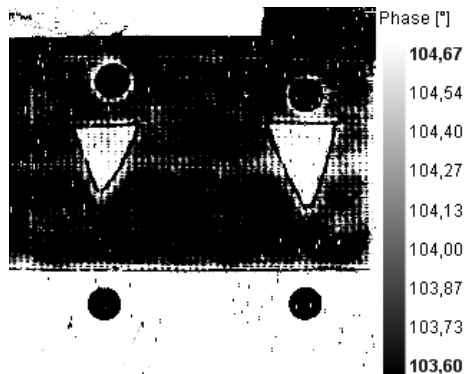
Fehlende Strukturen/ Einschlüsse - Thermografie

Testbauteil "Dreiecksplatte"

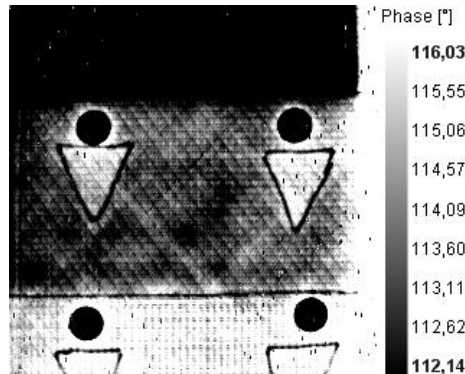
- Thermographieergebnis (IR): Bei allen drei verschiedenen Tiefen wurden die Einschlüsse detektiert.



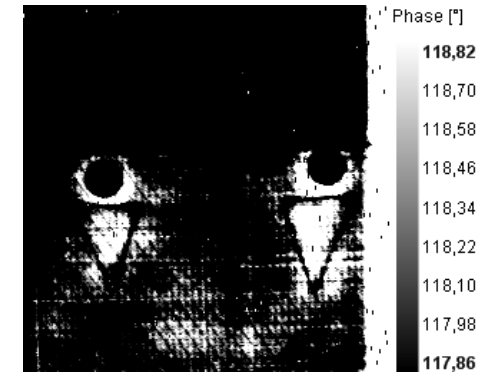
Links in Bildern Kohledoppler Biax; rechts Glasdoppler Biax



IR: Abschnitt 1



IR: Abschnitt 2



IR: Abschnitt 3

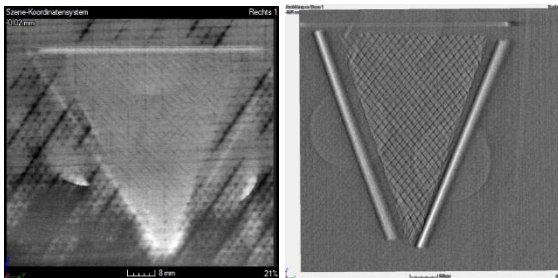
Anwendungskatalog

Fehlende Strukturen/ Einschlüsse - CT

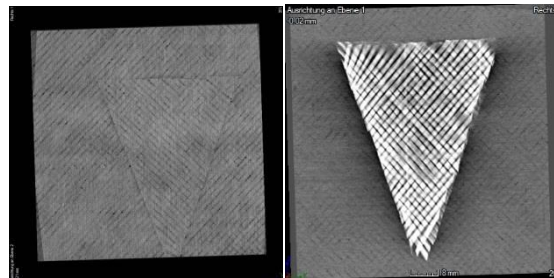
Testbauteil "Dreiecksplatte"

- **CT-Daten zum Vergleich:** Vollständige qualitative und quantitative 3D-Prüfung/Messung möglich

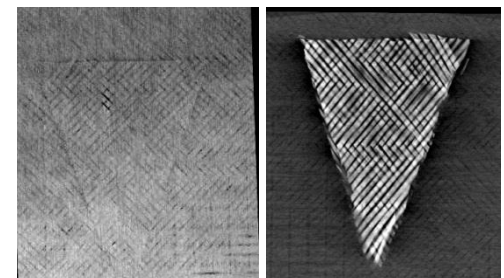
Links in Bildern Kohledoppler Biax; rechts Glasdoppler Biax



CT Schnittbild: Abschnitt 1



CT Schnittbild : Abschnitt 2



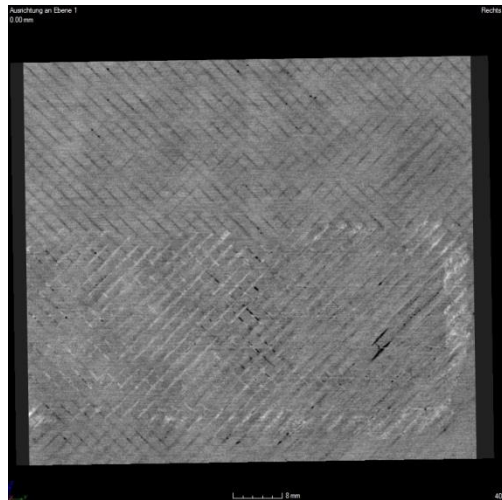
CT Schnittbild : Abschnitt 3

Anwendungskatalog

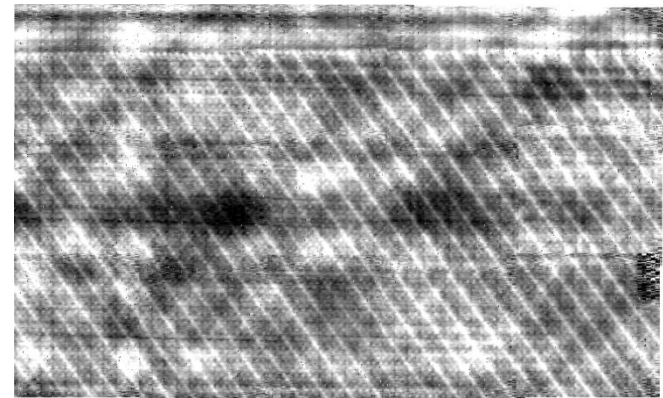
Identifikation nicht benetzter Stellen – Thermografie und CT

Testbauteil "Dreiecksplatte"

- IR-Ergebnis: Schwer auswertbar, keine eindeutige Fehlererkennung
- CT-Ergebnis: Fehler auch hier nur schwach (qualitativ) erkennbar



CT Schnittbild : Abschnitt 1



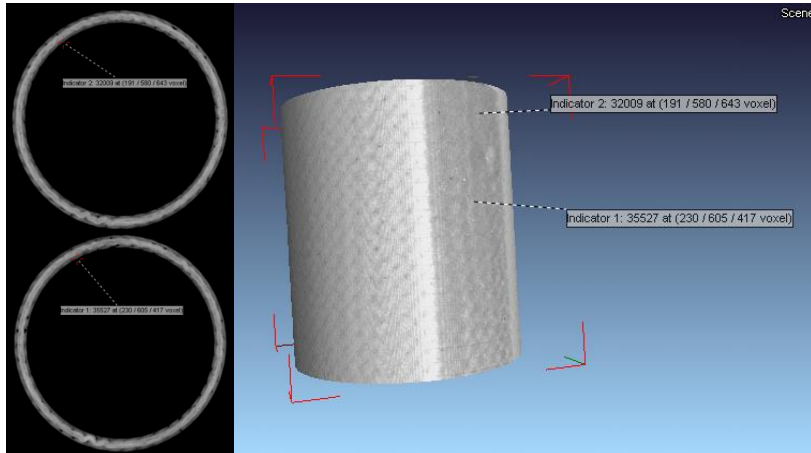
IR Abschnitt 1

Anwendungskatalog

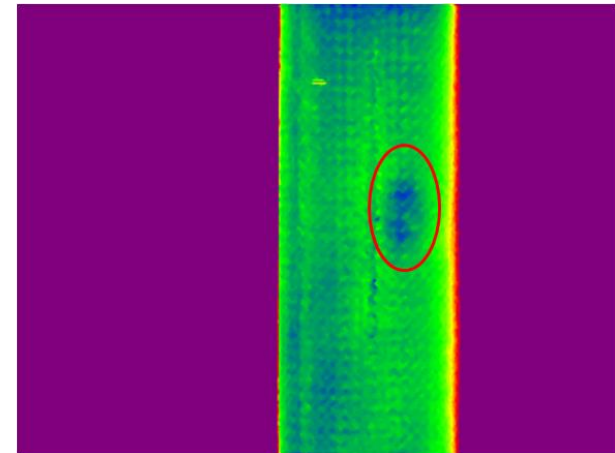
Impactschäden bei zylindrischer Form - Thermografie und CT

Testbauteile: Drei CFK-Rohre mit Impactschäden 5J, 20J und 40J

- **IR-Ergebnis:** 100% Qualitative Prüfung mit automatischer i.O/n.i.O Auswertung, solange Tiefe \leq Fehlerfläche im Bild
- **CT-Ergebnis:** Vollständige qualitative und quantitative 3D-Prüfung/Messung



CT Rohr 5J: Innere Fehlerausbreitung entlang Mantellinie **1,67 cm**



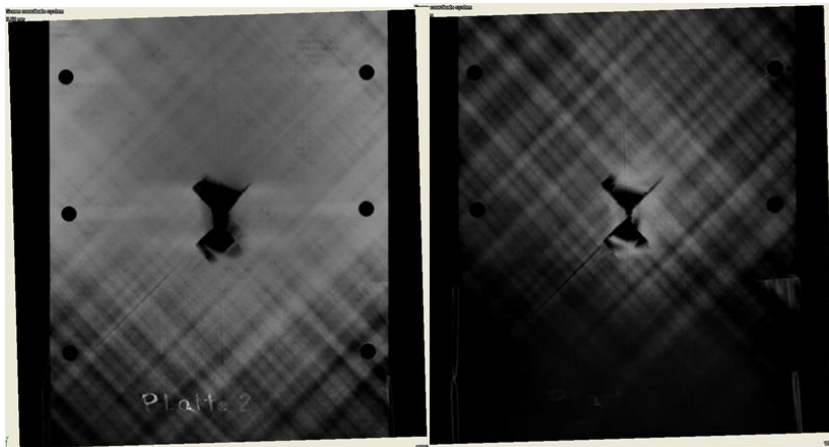
Innere Fehlerausbreitung **1,6 cm**

Anwendungskatalog

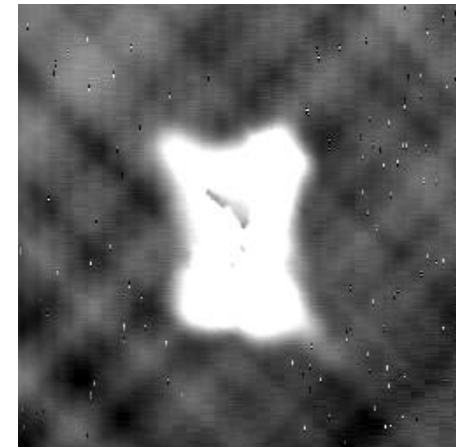
Impactschäden bei planarer Form - Thermografie und CT

Testbauteile: Vier CFK-Platten mit starken Impactschäden

- **IR-Ergebnis:** 100% Qualitative Prüfung mit automatischer i.O/n.i.O Auswertung, solange Tiefe \leq Fehlerfläche im Bild
- **CT-Ergebnis:** Vollständige qualitative und quantitative 3D-Prüfung/Messung



CT Platte 2 Schnittbilder: Keine/kaum inneren Fehlerausbreitung erkennbar



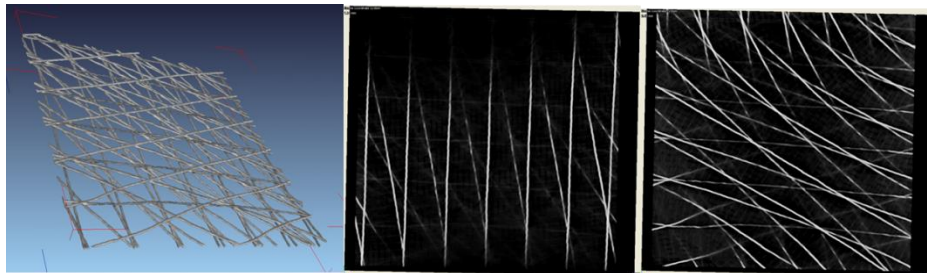
IR Platte: Keine/Kaum innere Fehlerausbreitung erkennbar

Anwendungskatalog

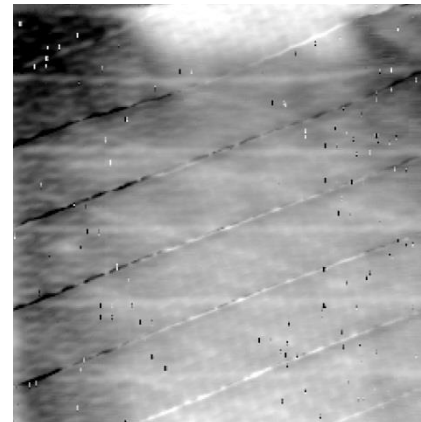
Erkennung von Fäden der Trägerstruktur - Thermografie und CT

Testbauteil: „Fadenplatte“: Platte mit sichtbaren Fäden in verschiedenen Tiefen

- **IR-Ergebnis:** Fäden erkennbar bis zu einer Tiefe von 1,21 mm (Richtwert 150µm CT-Auflösung)
- **CT-Ergebnis:** Vollständige Auswertung in Schnittbildern, nur eingeschränkt durch Auflösung (150 µm)



CT Fädenplatte: 3D-Ansicht und Schnitte:
Bestimmung der jeweiligen Fadenrichtung pro
Schichtbild/Tiefe



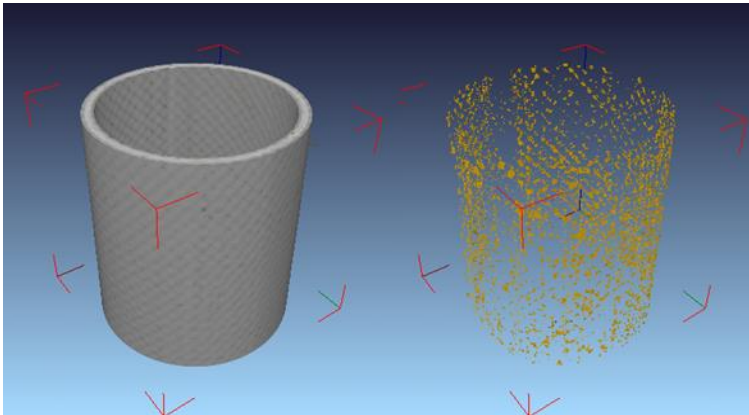
IR Fädenplatte: Fäden prüfbar/sichtbar
sind maximal 3 Lagen

Anwendungskatalog

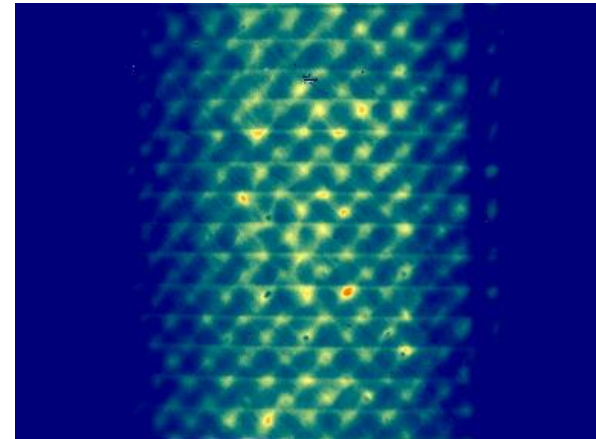
Poren, Lunker, Löcher - Thermografie und CT

Testbauteil: Rohr

- **IR-Ergebnis:** qualitative Aussage über Existenz von Poren möglich, solange Tiefe Pore \leq Fehlerfläche im Bild
- **CT-Ergebnis:** Vollständige qualitative und quantitative 3D-Analyse möglich



CT Rohr: 3D-Ansicht vollständig (links)
und nur Poren (rechts): Porosität 1,71%



IR Rohr: Poren qualitativ erkennbar

Anwendungskatalog

Ondulation - Thermografie und CT

Testbauteil: Rohr

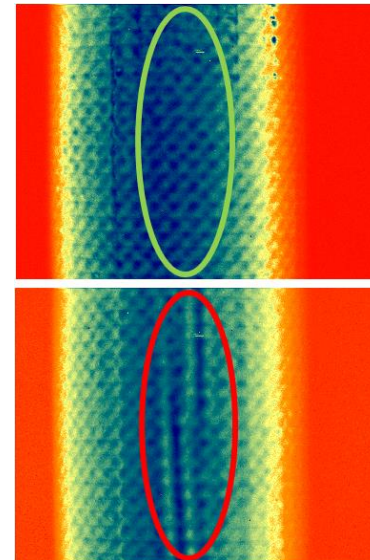
- **IR-Ergebnis:** qualitative Aussage über Existenz, Lage und Größe von Ondulationen möglich, solange Tiefe \leq Fehlerfläche im Bild
- **CT-Ergebnis:** Vollständige qualitative und quantitative 3D-Prüfung/Messung



Schicht 100

Schicht 600

CT Rohr: Schnittbilder mit sichtbarer Lageverschiebung/Wellenbildung



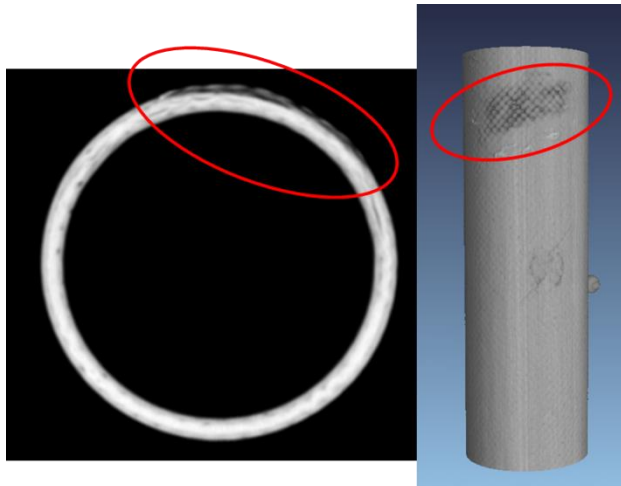
IR Rohr: Ondulation gut erkennbar

Anwendungskatalog

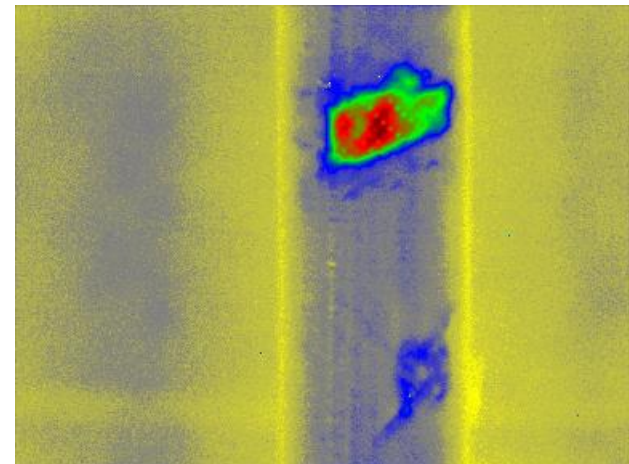
Trockenstelle - Thermografie und CT

Testbauteil: Rohr

- **IR-Ergebnis:** 100% Qualitative Prüfung, mit automatischer i.O./n.i.O Auswertung, solange Tiefe \leq Fehlerfläche im Bild
- **CT-Ergebnis:** Vollständige qualitative und quantitative 3D-Prüfung/Messung



CT Rohr: Schnittbild und 3D-Ansicht mit sichtbarer Trockenstelle



IR Rohr: Trockenstelle deutlich erkennbar

Anwendungskatalog

Allgemeine Aussagen/Einschränkungen

- **Thermographie:**

100% Qualitative Prüfung mit automatischer i.O/n.i.O Auswertung ist für eine Fehlerart möglich, solange die Tiefe des Fehlers \leq Fehlerfläche in Bildebene, allerdings maximal 2 cm unter der Oberfläche.

- **Computertomographie:**

Vollständige qualitative und quantitative 3D-Prüfung und/oder Messung ist unter der Voraussetzung möglich, dass die Voxelauflösung (Strukturauflösung) ausreichend hoch ist, dass der Fehler abgebildet werden kann.

Anwendungskatalog

Ergebniszusammenfassung

Thermographie liefert ausreichende qualitative Aussagen mit der Möglichkeit zur ROI-Bestimmung für weiterführende CT- oder andere sensorische Auswertungen:

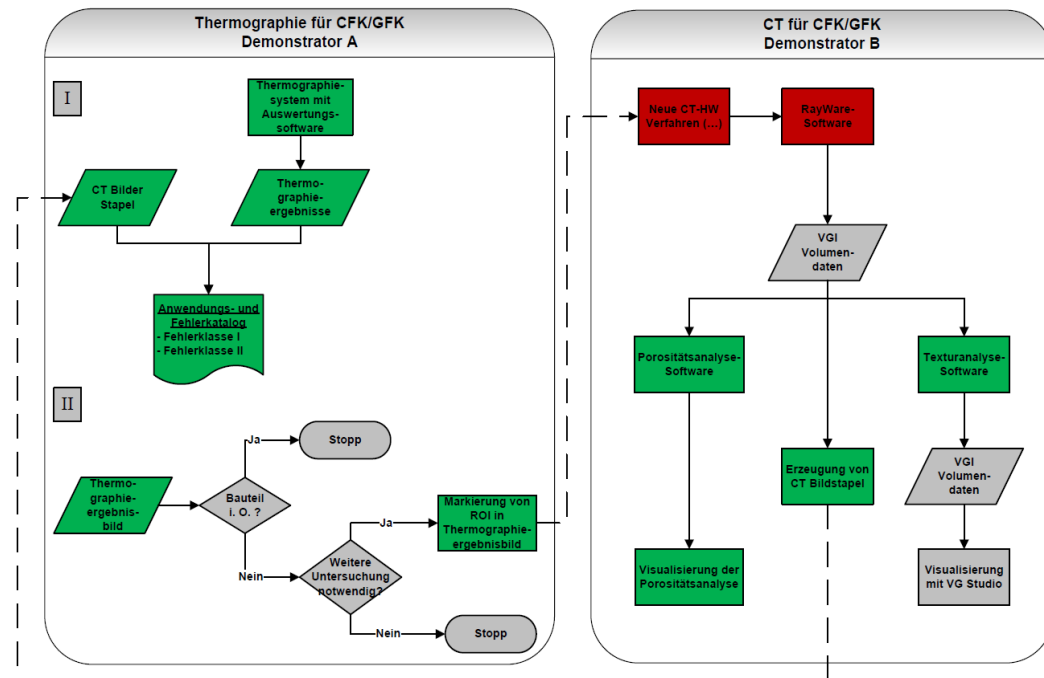
- **Fehlende Strukturen/Einschlüsse:** Fehlende Schichten, Einschlüsse, Verklebungen, Materiallegfehler bei realen Bauteilen
- **Impactschäden:** äußere sowie inneren Rissausbreitung bzw. Delaminationen, Schäden bei Lochungen bei realen Bauteilen
- **Erkennung von Fäden der Trägerstruktur:** Faserverschiebung, Faden-Nahtverschiebung, fehlende Naht bei realen Bauteilen
- **Poren/Lunker**
- **Ondulation:** Lageverschiebung, Wellenbildung im Inneren bei realen Bauteilen
- **Trockenstelle:** Fehlendes Harz, keine Aushärtung bei realen Bauteilen

IV. Zusammenfassung - Thermografie und CT

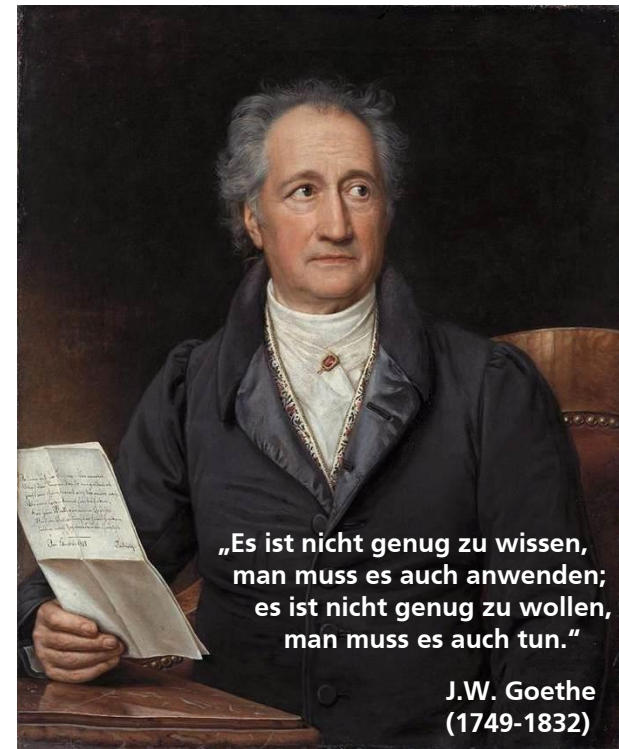
- Eignung der Thermographie für eine Vielzahl relevanter Fehler konnte mit Hilfe der CT bzw. Sollangaben nachgewiesen:

✓ **Thermografiesystem für eine schnelle qualitative Prüfung**

✓ Definition ROI für weitere, vollständigere CT quantitative Prüfung => **Deutliche Aufwands- und Kostenreduktion bei CT-Scans und dadurch allgemein beim Qualitätssicherungsprozess**



Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!



„Es ist nicht genug zu wissen,
man muss es auch anwenden;
es ist nicht genug zu wollen,
man muss es auch tun.“

J.W. Goethe
(1749-1832)