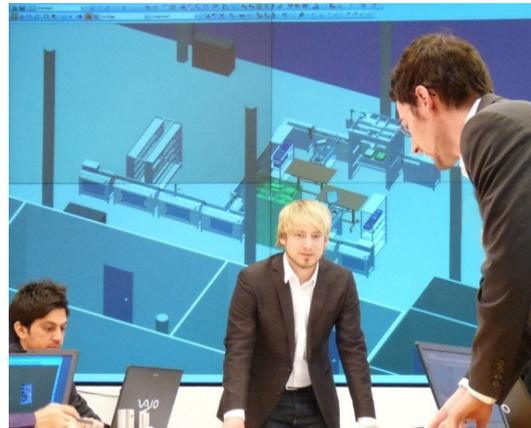

FRAUNHOFER IPA

INSTITUT FÜR PRODUKTIONSTECHNIK UND AUTOMATISIERUNG

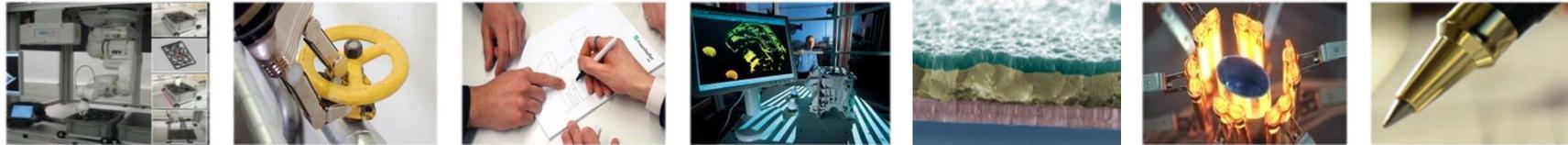
in Kooperation mit den Universitätsinstituten ISW und IFF



Wir produzieren Zukunft

Innovativ. Interdisziplinär. Nachhaltig.

Unterwegs zu einem modularen Multisensorsystem zur Inline- Qualitätsprüfung von Faserverbundwerkstoffen: Thermographie



Simina Fulga

Control Eventforum 2014

Unterwegs zu einem modularen Multisensorsystem.....

- (1) Thermographie zur Inspektion von Faserverbundwerkstoffen
- (2) QualiFibre: **Qualification** and Diagnosis of Carbon and Glass **Fibre**-Reinforced Composites with Non-Destructive Measurement Technologies

(1) Thermographie zur Inspektion von Faserverbundwerkstoffen

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

(1) Thermographie zur Inspektion von Faserverbundwerkstoffen

I. Entwicklung des Thermographie Gesamtsystem

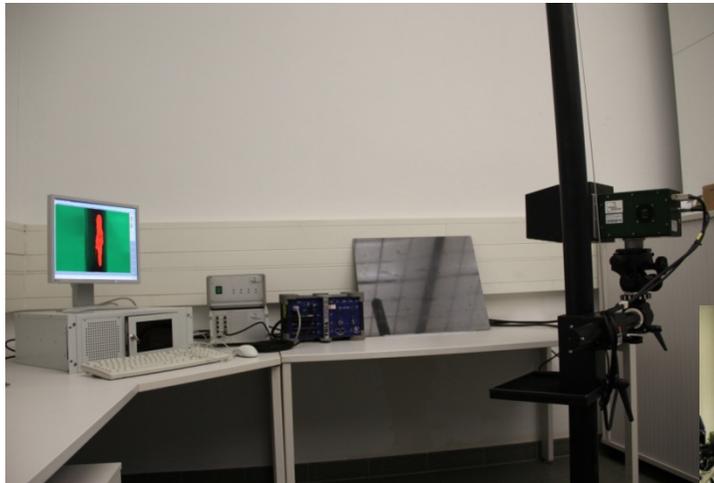
II. Datenauswertung

III. Anwendungskatalog für Faserverbundbauteile - Ergebnisvergleich Thermographie und CT

I. Entwicklung des Thermographie 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 Thermographie Gesamtsystem

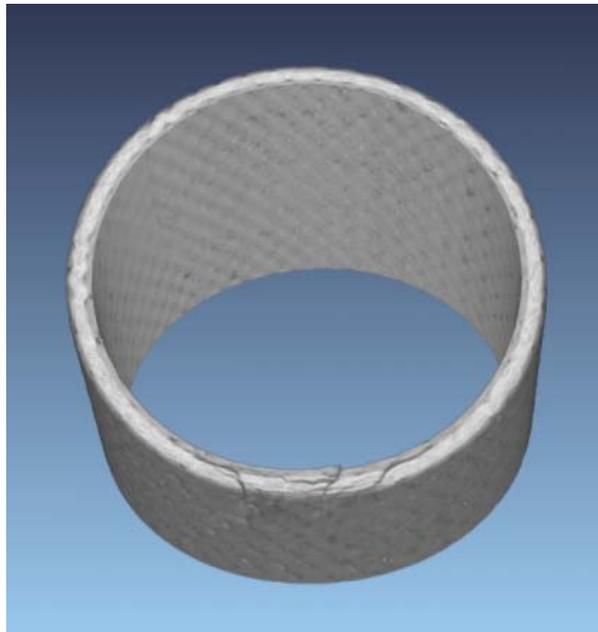
Entwicklung und Optimierung der Thermographie-Datenaufnahme (1/2)

- 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 Thermographie-Daten festzustellen ist

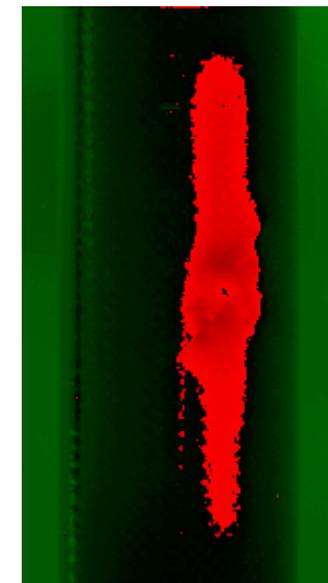
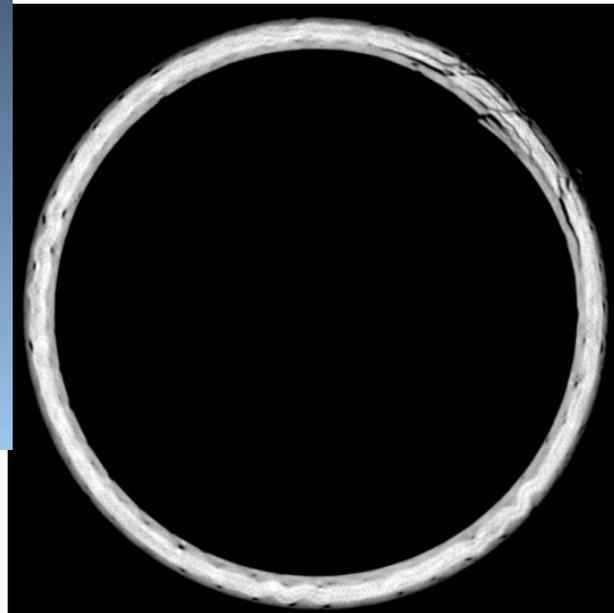
I. Entwicklung des Thermographie Gesamtsystem

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

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



CT-Ergebnisbilder



Thermographie-Ergebnisbild
(11 cm)

(1) Thermographie zur Inspektion von Faserverbundwerkstoffen

I. Entwicklung des Thermographie Gesamtsystem

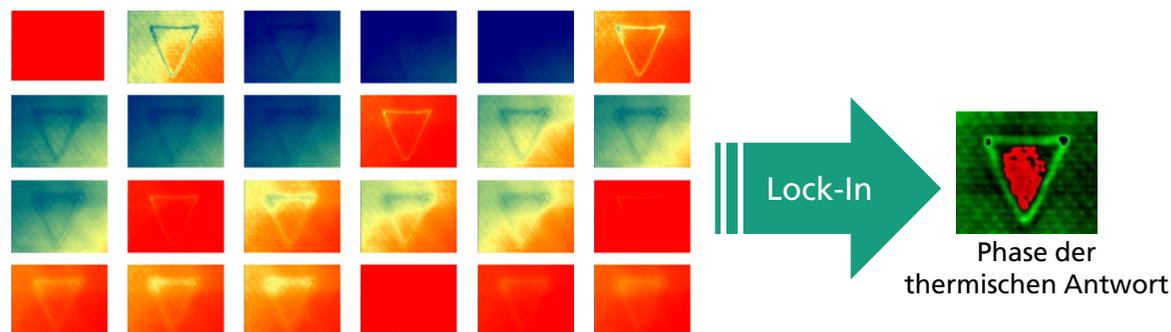
II. Datenauswertung

III. Anwendungskatalog für Faserverbundbauteile - Ergebnisvergleich Thermographie und CT

II. Datenauswertung

Thermographieauswertung

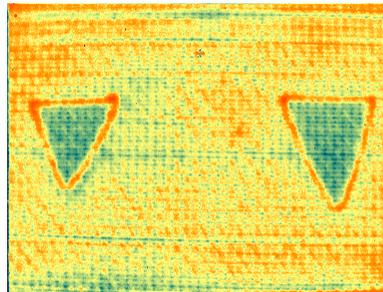
- Lock-In Thermographie zur Steigerung der Messempfindlichkeit
 - Das Prinzip beruht auf der Erfassung einer Temperaturmodulation, die auf der Probenoberfläche erzeugt wird - die induzierte Wärme breitet sich als Welle, die das Raum-Zeit-Verhalten der Temperaturmodulation beschreibt
 - Als sehr empfindliches 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



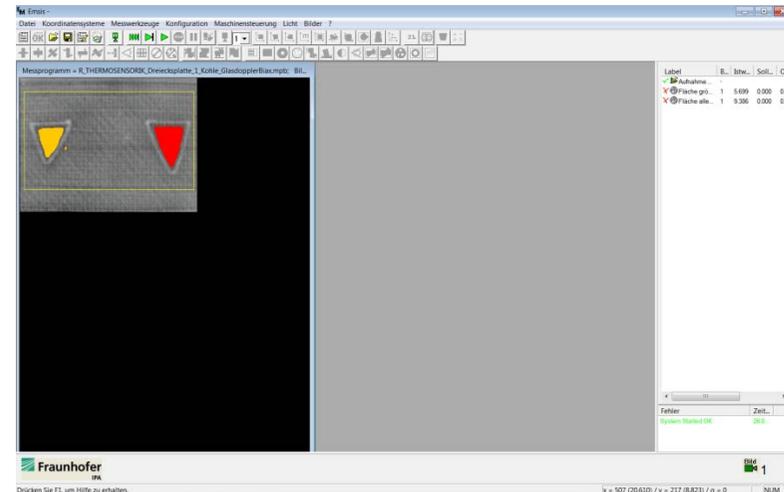
II. Datenauswertung

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

- Die Ergebnisse der Thermographieauswertungen 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

(1) Thermographie zur Inspektion von Faserverbundwerkstoffen

I. Entwicklung des Thermographie Gesamtsystem

II. Datenauswertung

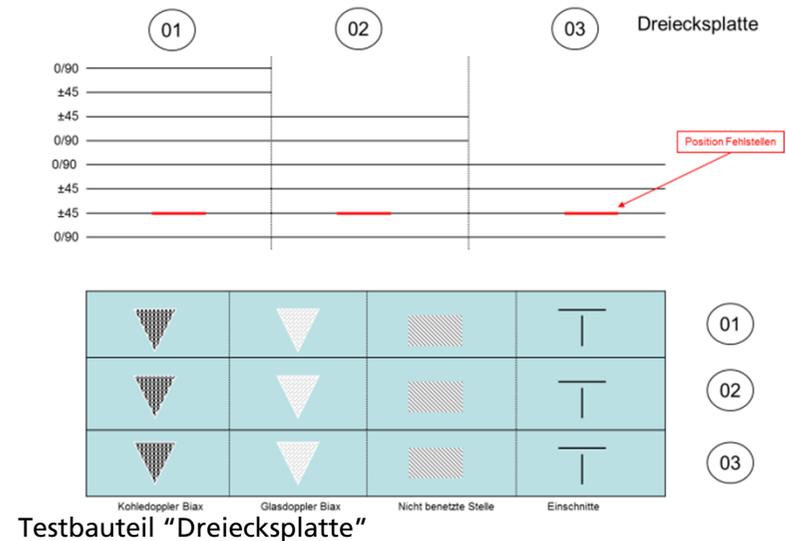
III. Anwendungskatalog für Faserverbundbauteile - Ergebnisvergleich Thermographie und CT

Anwendungskatalog: Voraussetzung

Anforderungsanalyse Faserverbundwerkstoffe AUDI

Identifizierte, zu untersuchende Fehlergruppen/-arten:

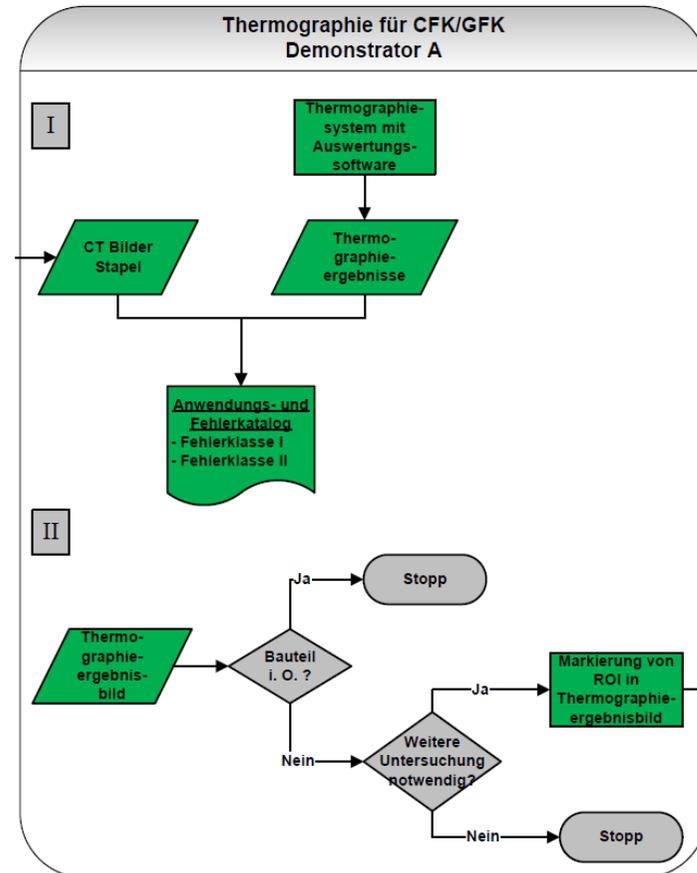
1. Fehlende Strukturen/ Einschlüsse
2. Identifikation nicht benetzter Stellen
3. Erkennung von Einschnitten
4. Impactschäden bei zylindrischer und bei planarer Form
5. Erkennung von Fäden der Trägerstruktur
6. Poren, Lunken, Löcher
7. Ondulation
8. Trockenstelle
9. Harzüberschuss bzw. Materialüberschuss



Anwendungskatalog: 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

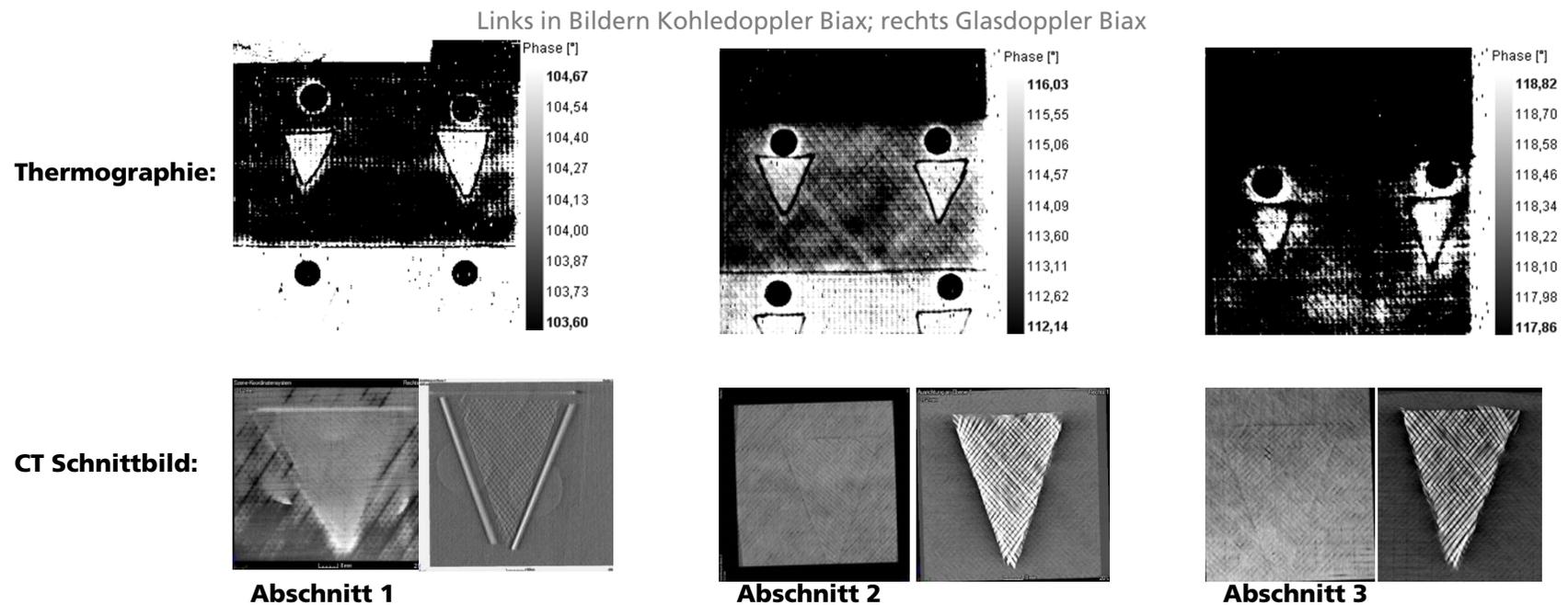


Anwendungskatalog

Fehlende Strukturen/ Einschlüsse

Testbauteil "Dreiecksplatte"

- **Thermographie-Ergebnis (IR):** Bei allen drei verschiedenen Tiefen wurden die Einschlüsse detektiert
- **CT-Daten zum Vergleich:** Vollständige qualitative und quantitative 3D-Prüfung/Messung möglich

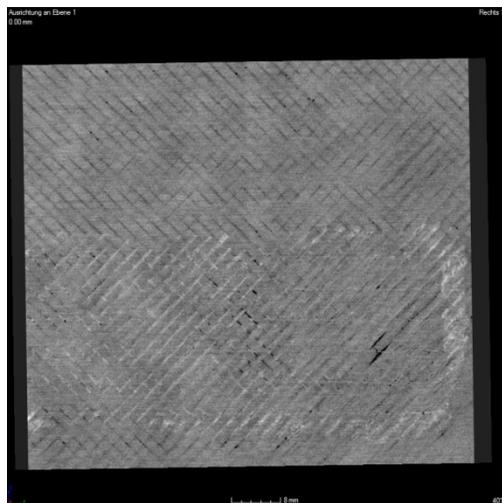


Anwendungskatalog

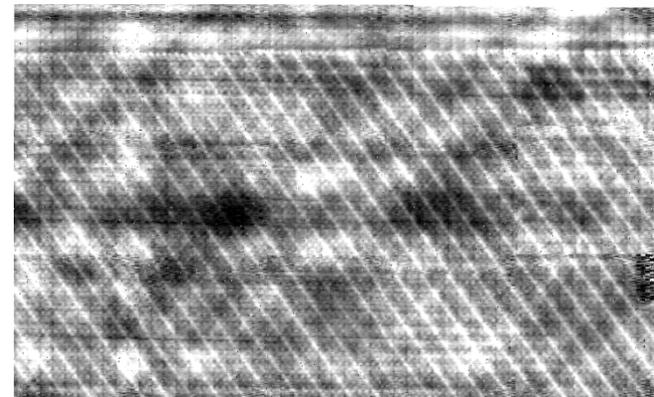
Identifikation nicht benetzter Stellen

Testbauteil "Dreiecksplatte"

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



CT Schnittbild : Abschnitt 1



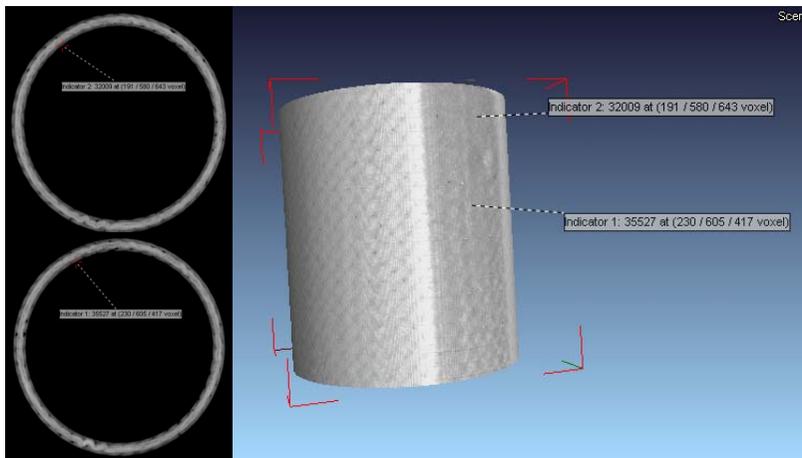
Thermographie: Abschnitt 1

Anwendungskatalog

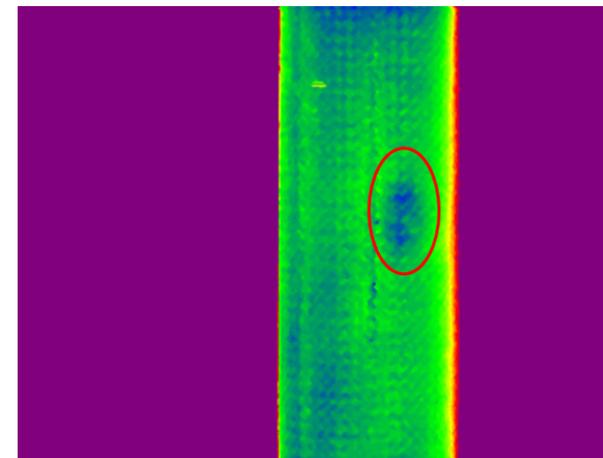
Impactschäden bei zylindrischer Form

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

- **Thermographie-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



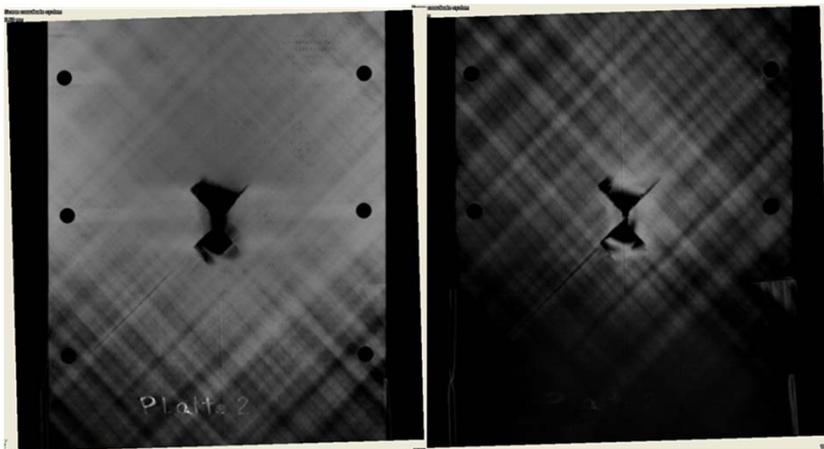
Thermographie Rohr 5J:
Fehlerausbreitung **1,6 cm**

Anwendungskatalog

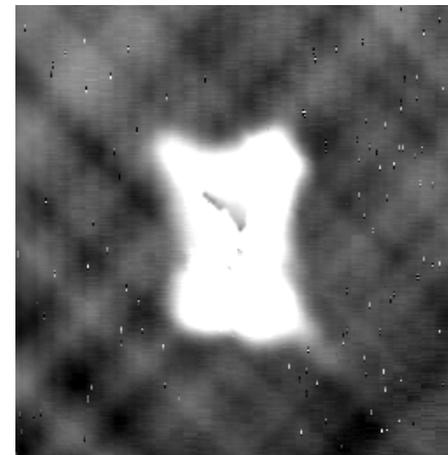
Impactschäden bei planarer Form

Testbauteile: Vier CFK-Platten mit starken Impactschäden

- **Thermographie-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



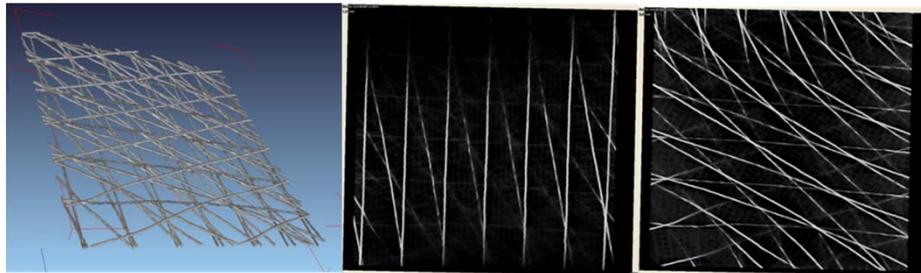
Thermographie Platte: Keine/Kaum innere Fehlerausbreitung erkennbar

Anwendungskatalog

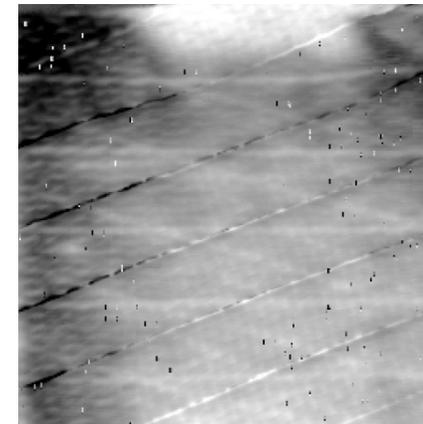
Erkennung von Fäden der Trägerstruktur

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

- **Thermographie-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



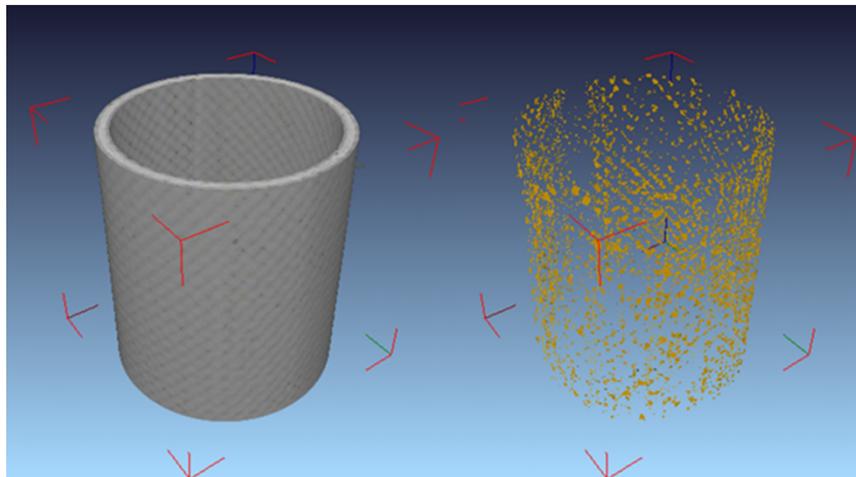
Thermographie Fädenplatte: Fäden prüfbar/sichtbar sind maximal 3 Lagen

Anwendungskatalog

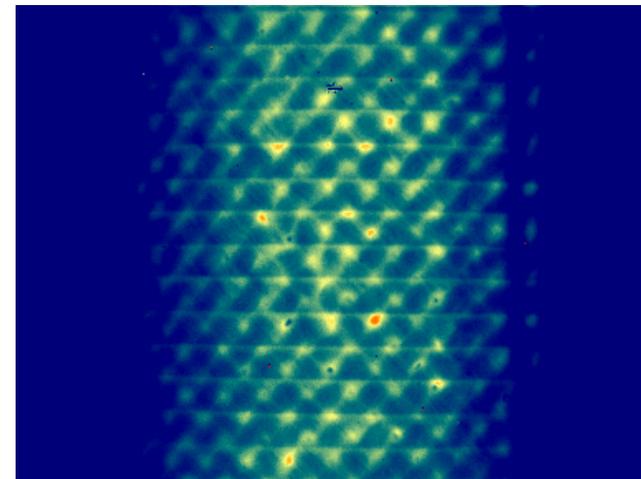
Poren, Lunker, Löcher

Testbauteil: Rohr

- **Thermographie-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%



Thermographie Rohr: Poren qualitativ erkennbar

Anwendungskatalog

Ondulation

Testbauteil: Rohr

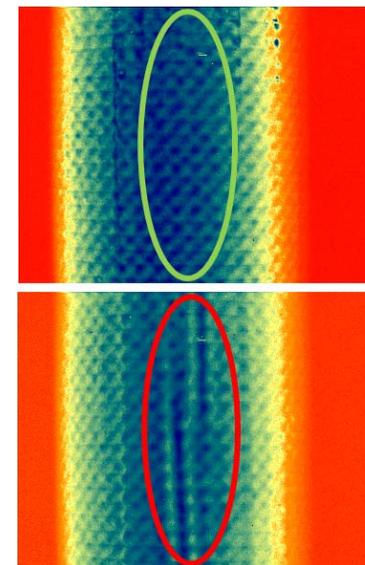
- **Thermographie-Ergebnis:** qualitative Aussage über Existenz, Lage und Größe von Ondulationen möglich, solange Tiefe \leq Fehlerfläche im Bild
- **CT-Ergebnis:** Vollständige qualitative und quantitative 3D-Prüfung/Messung



Schicht 100

Schicht 600

CT Rohr: Schnittbilder mit sichtbarer Lageverschiebung/Wellenbildung



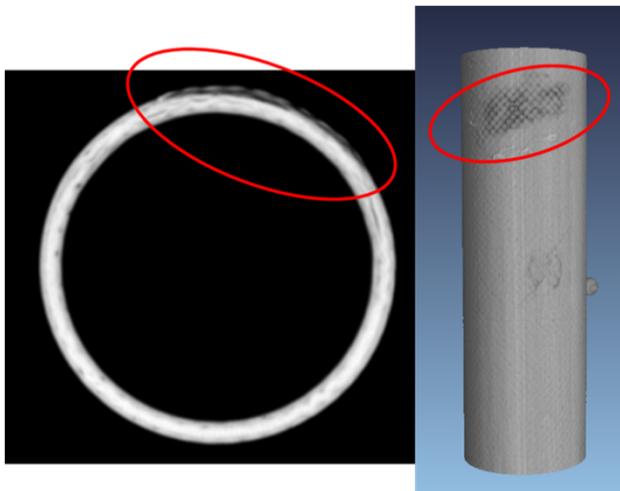
Thermographie Rohr:
Ondulation gut erkennbar

Anwendungskatalog

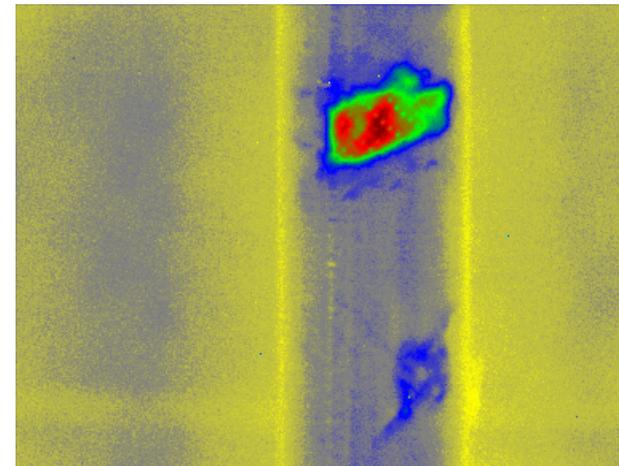
Trockenstelle

Testbauteil: Rohr

- **Thermographie-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



Thermographie 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

(1) Thermographie zur Inspektion von Faserverbundwerkstoffen

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

Unterwegs zu einem modularen Multisensorsystem.....

(1) Thermographie zur Inspektion von
Faserverbundwerkstoffen

(2) QualiFibre: **Qualification** and Diagnosis of Carbon
and Glass **Fibre**-Reinforced Composites with Non-
Destructive Measurement Technologies

(2) QualiFibre: Qualification and Diagnosis of Carbon and Glass **Fibre**-Reinforced Composites with Non-Destructive Measurement Technologies

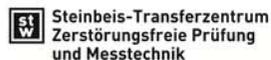


I. Überblick

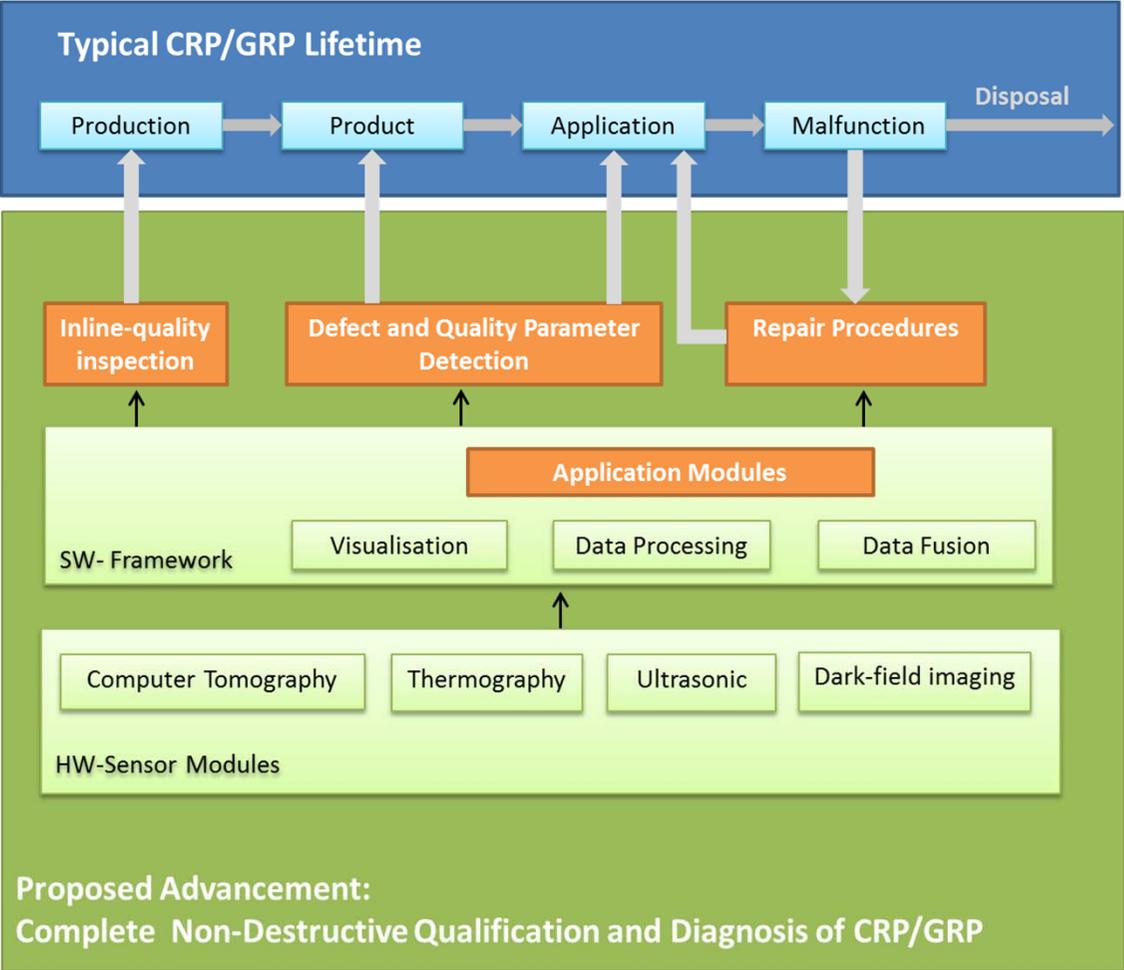
II. Festgelegte Anwendungen und erforderliche Software

III. Modulares Software-Framework

IV. Thermographie Module



QualiFibre Überblick



QualiFibre

Festgelegte Anwendungen und erforderliche Software (1/2)

Die festgelegten Anwendungen sind:

- **Thermographie- und Ultraschallprüfung:**
 - Qualifizierung von Ultraschall und Thermographie zur Inline-Prüfung und zur Prüfung in Workshops (Service-Werkstätten)

- **Fehlererkennung in Volumendaten:**
 - Erkennung aller inneren Material- und Strukturfehler und Materialanalyse mit Darkfield Imaging, CT oder der Kombination beider Sensortechnologien
 - Testteile: Kleine Automobil- und Flugzeugteile werden untersucht , z.B. Kofferraumteile (Daimler), Teile von Nimitech und Daher Socata

- **Qualifizierung von Reparaturprozessen:**
 - Einsatz von Ultraschall und Thermographie zur schnellen Fehlerklassifikation und CT für eine detaillierte Fehleranalyse um die Entscheidung einen Reparaturschritt durchzuführen

QualiFibre

Festgelegte Anwendungen und erforderliche Software (2/2)

Erforderliche Software entsprechend der festgelegten Anwendungen:

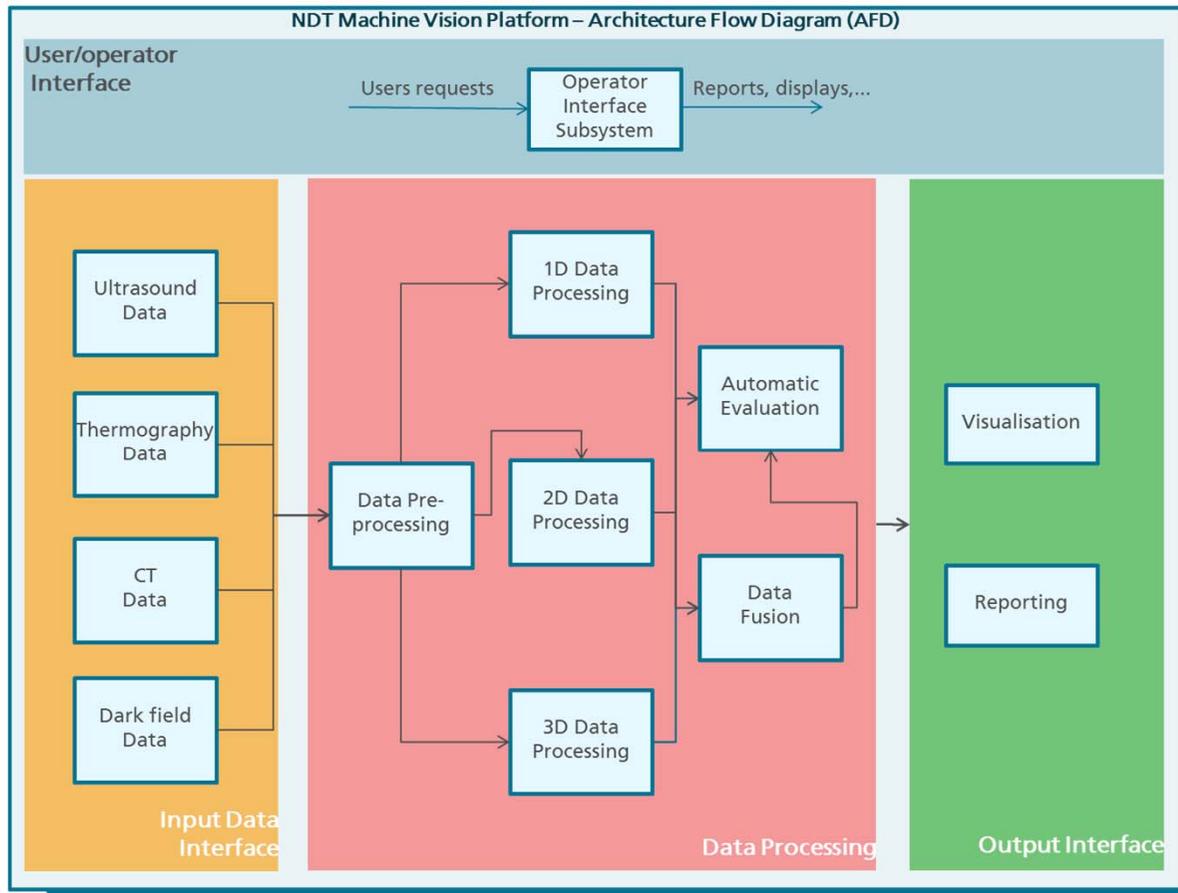
- **Kombinierte Prüfung mit Thermographie und Ultraschall:**
 - Qualifizierung von CT Daten als Bezugs- und Qualifizierungsmethode
 - 1D/2D Analyse: Automatische Fehlererkennung und Bildverarbeitungstools, basierend auf EMSIS
 - Datenfusion: 2D Datenfusion und 1D/2D Datenfusion
 - **Ergebnis:** Kombinierte 1D/2D Datenvisualisierung und kombinierte Prüfberichte

 - **Fehlererkennung in Volumendaten**
 - Volumenanalyse
 - Datenfusion: Röntgen-Darkfield-Imaging mit CT Volumendaten
 - **Ergebnis:** Kombinierte 3D-Daten Visualisierung

 - **Qualifizierung von Reparaturprozessen:** siehe oben
 - Zusätzliche Analyse: Bestimmung des Grads der Beschädigung und Qualifizierung des Reparaturprozesses
 - 3D Datenanalyse: CT Analyse für spezielle Bereiche, falls erforderlich und sinnvoll
 - **Ergebnis:** Umfassender Bericht, der Ergebnisse der jeweils verwendeten Technologien beinhaltet
-

QualiFibre

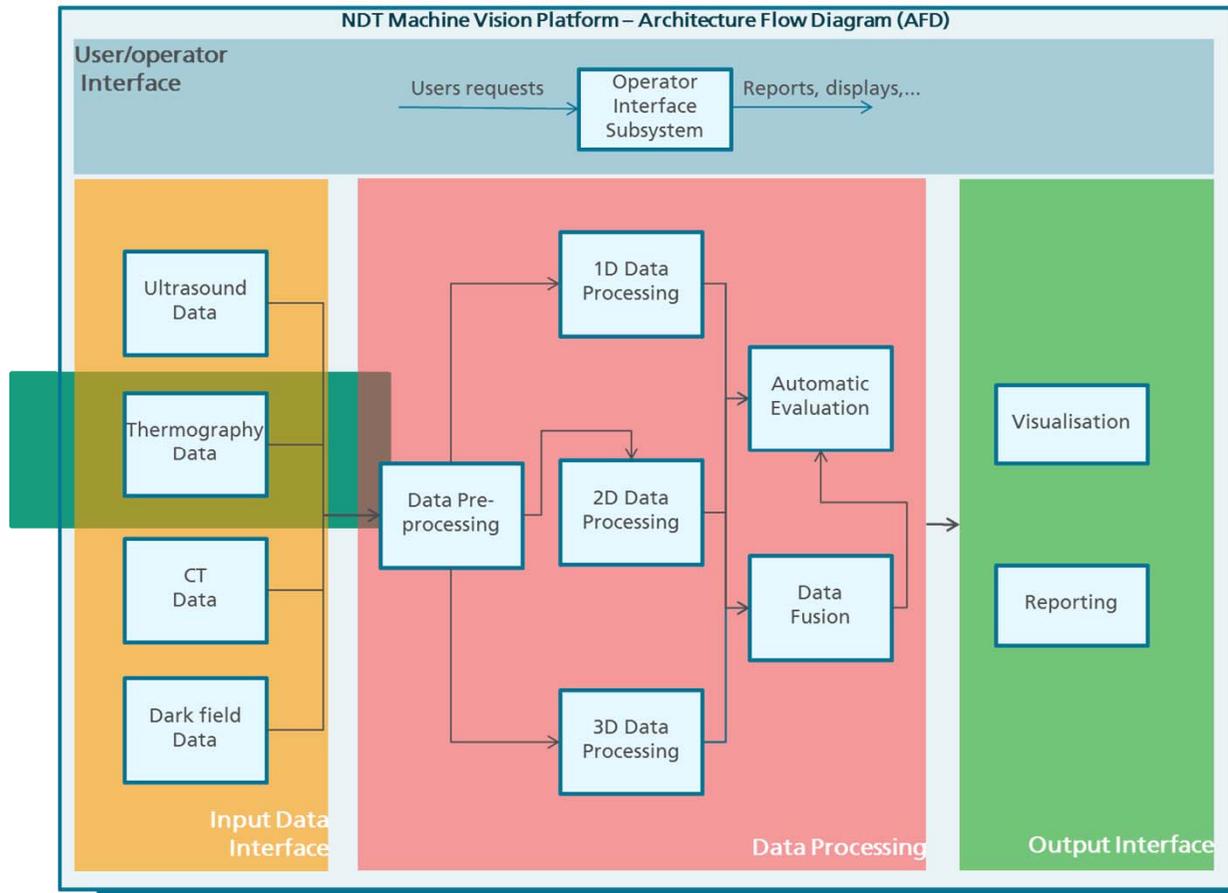
Modulares Software-Framework



Das „**NDT Machine Vision Platform**“ wird als modulares Software-Framework entwickelt => Trennung der Funktionalität der Plattform in unabhängige austauschbare Module

QualiFibre

Modulares Software-Framework



Das „**NDT Machine Vision Platform**“ wird als modulares Software-Framework entwickelt => Trennung der Funktionalität der Plattform in unabhängige austauschbare Module

QualiFibre

Thermographie Module

Datenerfassung und Bildsequenz-Verarbeitung:

- Abhängig von der Schnittstelle der IR-Kamera
- Jedes IR-Sensor verfügt über eine eigene Software-Bibliothek von Funktionen für die Kamerasteuerung, Bilddatenerfassung und grundlegende Bildverarbeitung:
 - Optris System+Flir Kameras/ WI (Winterthur Instruments) Tracer SDK
 - Thermosensorik CMT 384 M/SM Kamera/ Thermosensorik API
 - IRCAM Velox 65 kM Pro Kamera/ IRCAM API



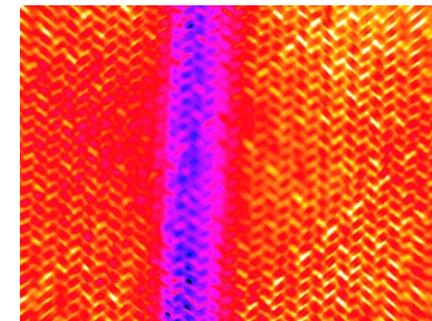
Optris PI450

Datenauswertung und Verarbeitung

- Thermographieauswertung: Aktive und Lock-In Thermographie
- Bildverarbeitung (i.O/n.i.O. Information): EMSIS entwickelt von IPA

Visualisierung:

- WI Tracer Plattform
- NDT Machine Vision-Plattform



WI Tracer
Phasenbild:Delamination

Unterwegs zu einem modularen Multisensorsystem.....

- (1) Thermographie zur Inspektion von Faserverbundwerkstoffen
- (2) QualiFibre: **Qualification** and Diagnosis of Carbon and Glass **Fibre**-Reinforced Composites with Non-Destructive Measurement Technologies

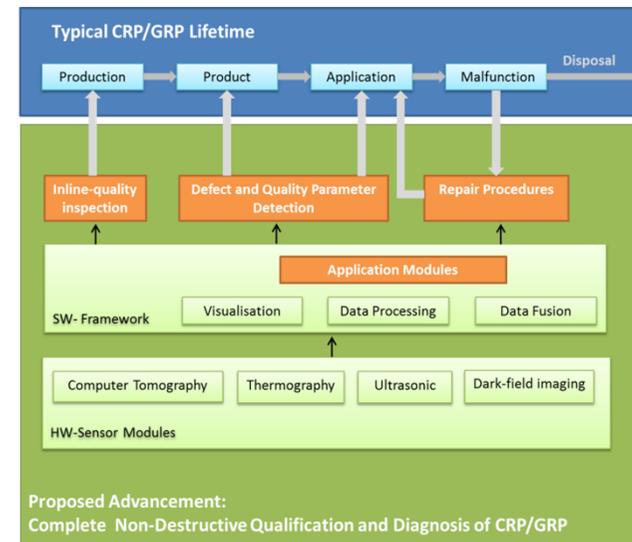
Zusammenfassung - Unterwegs zu einem modularen Multisensorsystem zur Inline-Qualitätsprüfung von Faserverbundwerkstoffen: Thermographie

(1) Thermographie zur Inspektion von Faserverbundwerkstoffen:

- ✓ Thermographiesystem 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

(2) QualiFibre:

- ✓ Konzeption von separaten Hardware-Setups
- ✓ Kombination von Sensor-Informationen auf der Software-Seite
- ✓ NDT Machine Vision Platform





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)

Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!