

# Laser Shearography NDT: Technologische Vorteile und Anwendungen in der Luft- und Raumfahrtindustrie

Roland WAHLER<sup>1</sup>, Liam CROSBIE<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dantec Dynamics GmbH, Ulm

Kontakt E-Mail: [rwr@dantecdynamics.com](mailto:rwr@dantecdynamics.com)

## Kurzfassung

Die Fähigkeit, Defekte in Luft- und Raumfahrtstrukturen mithilfe der Laser-Shearographie effektiv und effizient zu erkennen, ist allgemein bekannt. Die Technologie kann zur Erkennung einer Reihe von Fehlern eingesetzt werden, einschließlich: Delaminierungen, Kissing Bonds, gerissene Kerne, Eindringen und Fremdkörperschäden (FOD) in Laminaten, Waben, Schaumkernen und gebundenen Bauteilen. Shearografie-Systeme werden zur ZfP seit 20 Jahren für eine Reihe von Luft- und Raumfahrtanwendungen verwendet, darunter: Radomen, Hubschrauberblätter, Druckbehälter, Tanks und Steuerflächen. Der Vorteil der Durchführung wiederholbarer NDT-Inspektionen mit Laser-Shearographie sind hohe Inspektionsraten, nachvollziehbare und reproduzierbare Messergebnisse. Laser Shearografie ist eine zeiteffiziente und damit kostengünstige Lösung.

Flexible Lösungen für eine wachsende Anzahl von Testanwendungen erfordern die Bereitstellung einer agilen Roboterintegration. Die Validierung der Testergebnisse muss anhand von benutzerdefinierten Toleranzen festgelegt werden. Zuverlässige Messungen sind ein absolutes Vorrecht für jede ZfP-Technologie. Dies ist an sich schon eine Herausforderung, für die Dantec Dynamics die Lösung für Ihre Testanwendung hat.



# Laser Shearography ZfP: Technologische Vorteile und Anwendungen in der Luft- und Raumfahrtindustrie



Dantec Dynamics, a Nova Instruments company

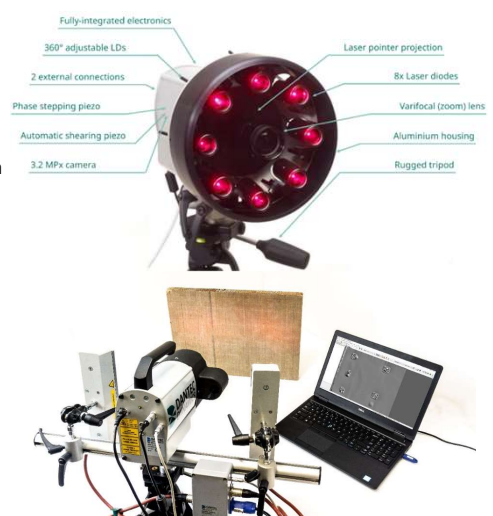
Laser Shearography NDT: Technologische Vorteile und Anwendungen in der Luft- und Raumfahrtindustrie

1

## LS NDT: Vorteile und Anwendungen in der Luft- und Raumfahrtindustrie 1. Einführung (I)



- › Die Laser-Shearographie (LS) ist eine **optische, zerstörungsfreie Prüftechnik (ZfP)**, die auf dem Prinzip der **Laser-Speckle-Interferometrie (Scherinterferometrie)** basiert.
- › Ein Laser Shearography NDT-System besteht aus einem **Messsensor** (z.B. FlawExplorer oder FlawScout-Sensor) zusammen mit einem **Anregungssystem** (z.B. Wärmelampen zur thermischen Anregung).
- › Ein Laser-Shearography-Sensor besteht aus den folgenden Elementen
  1. eine **divergente Laserquelle** (über Laserdioden der Klasse 3A / R mit geringer Leistung) → Informationsquelle,
  2. eine **CMOS Kamera** → (Aufnahme-) Medium,
  3. Ein **Scherpiezo & Strahlenteiler** → Messempfindlichkeit,
  4. Ein **Phasenschieber** → Verringert die Sensibilität des Messrauschens, and
  5. Ein **SW Algorithmus** → erweiterte Echtzeit- und Nachbearbeitung von zeitaufgelösten Bildern



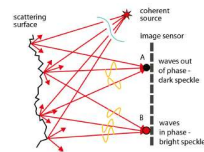
Laser Shearography NDT: Technologische Vorteile und Anwendungen in der Luft- und Raumfahrtindustrie

2

- › Wenn eine **monochromatische und kohärente Laserlichtquelle (1)** auf eine **raue Oberfläche** trifft, bewirkt die **Oberflächenmikrostruktur**, dass die Lichtquelle streut und ein **einzigartiges stochastisches Speckle-Muster bildet** (etwa wie ein Fingerabdruck)
- › Die von der **Objektoberfläche** reflektierten Wellen erreichen den **Kamerasensor** in **verschiedenen Phasen** aufgrund der unterschiedlichen Weglängen und auch aufgrund der Trennung durch den internen **Strahlenteiler**. (3) Dieser Effekt wird als **Scherinterferometrie** bezeichnet.
- › Die **Phaseninterferenz** jeder Welle trägt bei jedem Pixel der Kamera zur Intensität bei (2)
- › Ein **SW-gesteuerter** Scher-Piezo bestimmt die **Größe** der Strahlentrennung. Das wiederum bestimmt die **Mesempfindlichkeit** des Sensors.

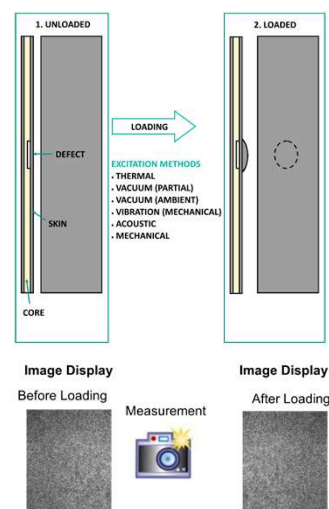


Source:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Speckle\\_pattern](https://en.wikipedia.org/wiki/Speckle_pattern)



Source:  
<https://physics.stackexchange.com/questions/280275/how-subjective-laser-speckle-pattern-is-formed>

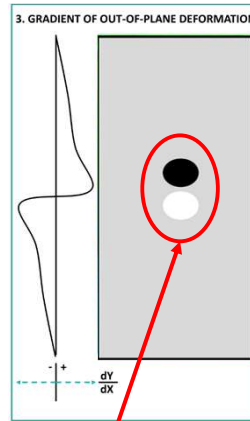
- › Wenn das Messobjekt unter einer **Last oder Spannung** gesetzt wird, verformt sich die **Oberfläche** über einem Defekt stärker im Verhältnis zum Umgebungsmaterial. Getrennte Defekte verursachen hier eine **lokalierte Schwäche** in der Struktur.
- › Wenn sich die **Oberflächenform ändert** (d.h. das **Objekt belastet** wird), ändert sich damit auch das Speckle-Muster. Laser Shearography NDT misst das sich **ändernde Speckle-Muster ( $\Delta$ )** mittels **Bildsubtraktion** zwischen den **beiden Lastzuständen**
- › Physikalisch betrachtet ist dies die Visualisierung, in welcher Art ein **Material** auf die aufgebraachte Last **reagiert (sich biegt)**,
- › LS beobachtet nur die Oberfläche der Struktur und dringt nicht in die Probe selbst ein. Defekte unter der Oberfläche werden durch die Art und Weise bestimmt, wie diese Defekte die Oberflächen (Biege-) Dehnung beeinflussen.



$\Delta$  = Measurement - Reference

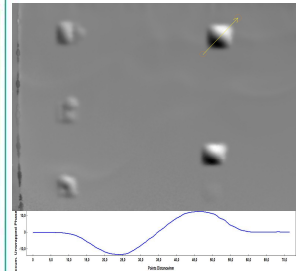
- › Messungen **vor** und **nach** einer **Laständerung**, werden in einem **2D-Shearogramm** dargestellt (auch als **Phasenbild** bezeichnet).
- › Unterschiede / Abweichungen im Material können durch lokalisierte **Änderungen des Verformungsgradienten in Z-Richtung** identifiziert werden - erkennbar als **Schwarz-Weiß-Streifen**.
- › Ein **Phasenbild** wird durch die Erfassung mehrerer Aufnahmeschritte berechnet. Unter Verwendung des **Phasenschiebers** (4) und über den **SW-Algorithmus** (5) können diese aufgelöst werden. Das Phasenbild erzeugt ein zeitlich gefiltertes Ergebnis, das gegenüber Umgebungsrauschen unempfindlich ist.
- › Daher liefert die Laser-Shearographie einen **hohen Rauschabstand** (SNR). Dadurch **werden tatsächlich vorhandene Defekte** mit niedrigster Fehlerquote **bestätigt**.
- › Ein **Streifen** besteht aus einer **grau → schwarz → weißen → grauen Umwandlung (2π-Phasensprung)**. Streifen können mit isometrischen (konstanten) Linien der **Z-Verschiebung** verglichen werden

**Shearogramm**  
 (Phase Map)



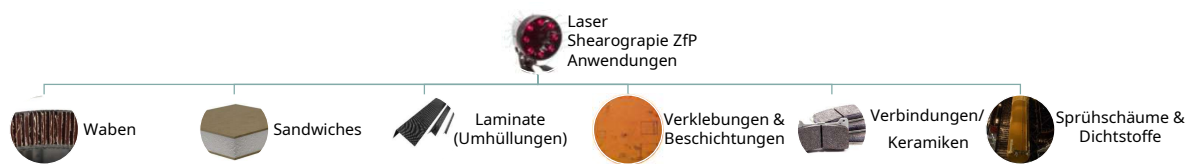
**Butterfly Pattern**  
 (Consisting of Fringes)

**4+4 (Wrapped) Phase Display**



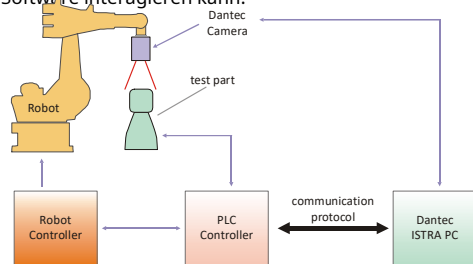
$$SNR = \frac{\text{Signal}}{\text{Noise}} = \frac{12.5}{0.8}$$

- › Die Wirksamkeit (und auch Empfindlichkeit) der Laser-Shearographie hängt von der Art der Anwendung aber auch von der Fähigkeit der Anregungstechnik ab, eine entsprechende **Biegebelastung** für das Testobjekt zu erzeugen



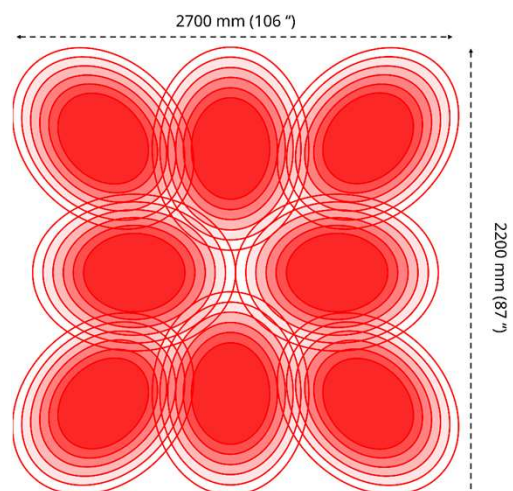
- › Jede Anregung hat **verschiedenen Anwendungsbereiche**, teilweise abhängig von den **Material-/Oberflächeneigenschaften**, aber auch vom **Aufbau des Probenquerschnitts**.
- › Die Laser-Shearographie ist eine der wenigen ZfP-Techniken, die Fehler in der Wabenstruktur, Faltungen (Wrinklings) in Laminaten und Kissing Bonds effektiv erkennt.

- › Laser-Shearographie gehört zu den am einfachsten zu automatisierenden ZfP-Techniken. Unsere Software Istra4D verfügt über eine optionale integrierte Remote-API, mit der Standardtestverfahren vollständig automatisiert werden können
- › Dieses Feature besteht aus einem SW-Protokoll, auf dessen Basis eine SPS-Steuerung mit der Istra4D-Software interagieren kann.

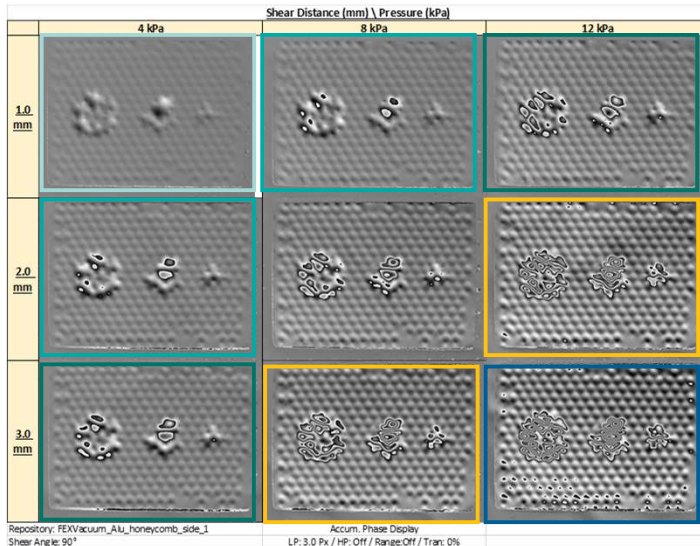


Laser Shearography NDT: Technologische Vorteile und Anwendungen in der Luft- und Raumfahrtindustrie

- › Die Laser-Shearographie weist im Vergleich zu jeder ZfP-Methode eine der höchsten Inspektionsraten auf, insbesondere weil ein großes Sichtfeld (FoV) durch die Nutzung mehrerer Laserdioden ermöglicht wird.
- › Beim FlawExplorer mit 8 Laserdioden ergibt sich eine große Beleuchtungsfläche.  
**Pro Inspektion** können ca. **2.7 m (H) x 2.2 m (V) = 6 m<sup>2</sup>** erreicht werden
- › In Verbindung mit einer kurzen Belastungszeiten kann eine Inspektionsrate von mehreren m<sup>2</sup> pro Minute erreicht werden! Dies ermöglicht schnellere und wirtschaftlichere ZfP-Inspektionen.



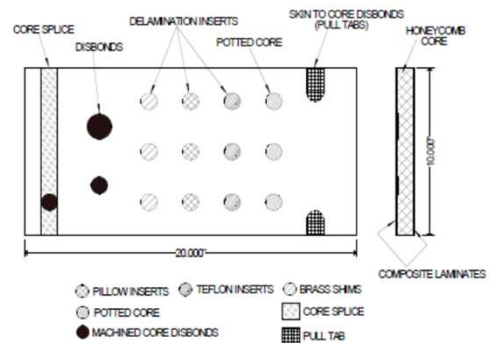
Laser Shearography NDT: Technologische Vorteile und Anwendungen in der Luft- und Raumfahrtindustrie



- > Die Messempfindlichkeit (d. H. Anzahl oder Dichte der Streifen) ist Abhängig von
- der Laserwellenlänge,
  - der Scher-Empfindlichkeit (mm)
  - und dem Ausmaß der Biegung (z.B. dem verwendeten Angelegtem Druck).

$$\Delta_x = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \delta x \cdot \frac{\partial w(x, y)}{\partial x}$$

- > 2016 wurde von der Federal Aviation Administration (FAA) (USA) eine unparteiische, quantitative Bewertung konventioneller und fortschrittlicher ZFP-Technologien in Auftrag gegeben, um Fehler in zusammengesetzten Wabenstrukturen bei Flugzeugen festzustellen.
- > Es wurden 6 Referenzplatten aus Wabenstruktur erstellt: Abdeckung mit Carbonfaser- (CF) und / oder Glasfaser (3, 6 oder 9-lagig) Kern: 1 " dicken Nomex® (Aramid).
- > Die Fehlertypen enthielten:
  - Delaminationen
  - Schichttrennungen, die eine Luftspalt simulieren,
  - Trennungen, die zwar einen engen Kontakt, aber keine Haftfestigkeit besitzen um Kissing Bonds zu simulieren,
  - und Schlagschäden (z. B. Kernquetschungen, Trennungen, Delaminationen und gebrochene Fasern).
- > Ziel des Tests war die Wahrscheinlichkeit der Erkennung (PoD) mit einer 95% Konfidenzintervall, sowie die Falschbeurteilungen von 20 verschiedenen Technologien zu bestimmen.



A Quantitative Assessment of Conventional and Advanced Nondestructive Inspection Techniques for Detecting Flaws in Composite Honeycomb Aircraft Structures; DOT/FAA/TC-15/63 Federal Aviation Administration William J. Hughes Technical Center Aviation Research Division December 2016

### 3. Vorteile der Laser Shearographie (V)

#### Erkennungswahrscheinlichkeit (PoD)

- › Laser-Shearographie hatte den besten durchschnittlichen PoD von 90% aller 6 Referenztafeln, das bedeutet, dass die kleinsten Fehler in allen Referenztafeln mit einem 95% Konfidenzintervall entdeckt wurden.
- Gleich mit Thermografie (IR)
- 2 x besser als Ultraschall (UT)
- 1,4 x besser als Röntgenprüfung (RT)
- 2.5 x besser als die Klopfprobe (TH Tap Hammer)



#### Falschbeurteilung (False Call Rate)

- › Laser-Shearographie hatte die beste durchschnittliche Falschbeurteilung (0,2) im Vergleich zu allen anderen (20) ZfP-Techniken. Bei allen durchgeführten Inspektionen wurde nur ein falsches Ergebnis getätigt.
- 7 x besser als Thermografie (IR)
- 15 x besser als Ultraschall (UT)
- 3 x besser als Röntgenprüfung (RT)
- 15 x besser als die Klopfprobe (TH)

- › Laser-Shearographie (LS) bietet die beste Verbindung von Erkennungswahrscheinlichkeit PoD und Falschbeurteilung (False Call-Rate) für die Inspektion von Wabenproben im Vergleich zu allen anderen ZfP-Techniken.
- › Mit der Laser-Shearographie haben Sie die beste Möglichkeit, auch kleine Fehler zu finden ohne falsch zu liegen

### 4. LS Anwendungen – Aluminium Honeycomb (I)

<b>Testobjekt</b>	Querruder eines Kampffjets
<b>Anregung</b>	<b>Unterdruck Belastung</b> 0 kPa → 5 kPa
<b>Arbeitsabstand</b>	600 mm (23.6 ")
<b>Prüfdauer</b>	5 sec
<b>Inspektions-Rate</b>	<b>1.4 m<sup>2</sup>/min</b> <b>(15.2 ft<sup>2</sup>/min)</b>



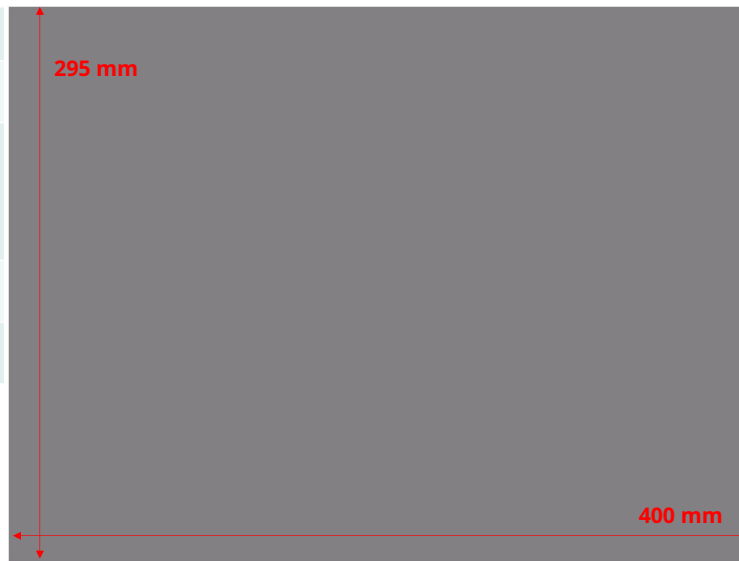
### 4. LS Anwendungen – Aluminium Honeycomb (II)

<b>Testobjekt</b>	Querruder eines Kampffjets
<b>Dicke der Deckschicht</b>	5 - 10 mm (0.19" - 0.39")
<b>Anregung</b>	<b>Unterdruckbelastung</b> 0 kPa → 4 kPa
<b>Arbeitsabstand</b>	1000 mm (39.4")
<b>Prüfdauer</b>	5 sec
<b>Inspektions-Rate</b>	<b>1.4 m<sup>2</sup>/min</b> <b>(12.8 ft<sup>2</sup>/min)</b>



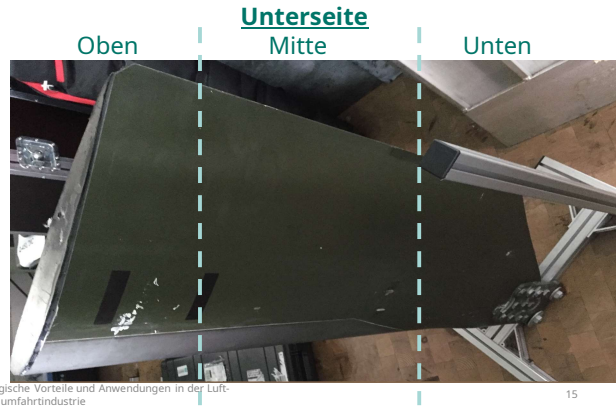
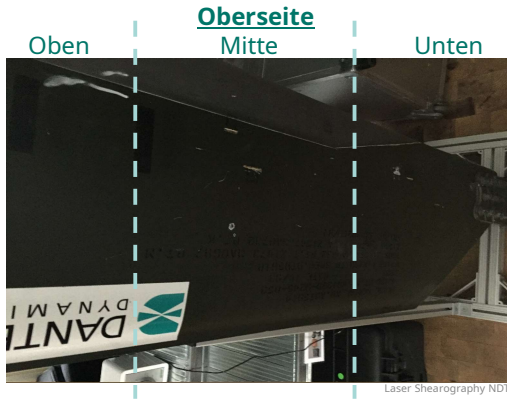
### 4. LS Anwendungen –Aramid Honeycomb (III)

<b>Testobjekt</b>	Teil eines Triebwerkgehäuses
<b>Größe</b>	500 mm x 350 mm (19.7" x 13.8")
<b>Anregung</b>	<b>Thermische Belastung</b> 2x 1000W Spot Halogen Wärem: 6 sec Abstand: 600 mm (2') Shear: 5 mm @ 45°
<b>Prüfdauer</b>	15 sec
<b>Inspektions-Rate</b>	<b>0.5 m<sup>2</sup>/min</b> <b>(5.1 ft<sup>2</sup>/min)</b>

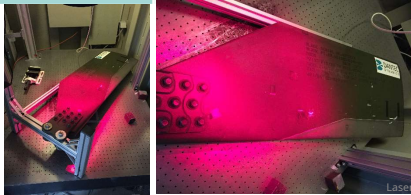




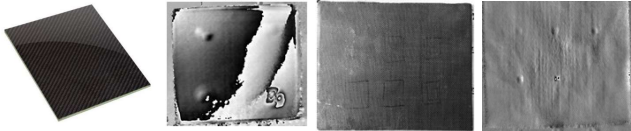
<b>Testobjekt</b>	Heckrotorblatt Lynx Westland
<b>Aufbau</b>	Aluminium Honeycomb
<b>Größe</b>	1000 mm (Spannweite) x 390 mm (Querschnitt) (39.4" x 15.4")



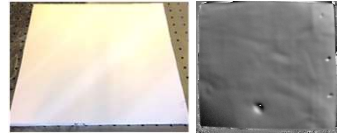
<b>Anregung</b>	Unterdruck Belastung 0 kPa → 10 kPa Arbeitsabstand: 1000 mm (39.4") Scherparameter: 1 mm @ 45°		<b>Unterseite</b>	<b>Oberseite</b>
<b>Anzeige</b>	Accumulated Phase Display LP: 3.0 Px HP: Off Display Range: $-\pi$ to $+\pi$	<b>Oben</b>		
<b>Messfeld</b>	330 mm x 240 mm (13.0" x 9.5")	<b>Mitte</b>		
<b>Prüfdauer</b>	<b>10 sec je Abschnitt</b> <b>2 min für das ganze Blatt</b>	<b>Unten</b>		



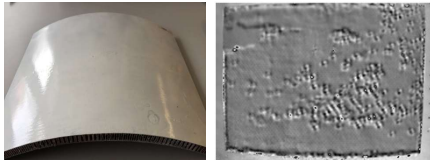
- › Laminats einschließlich Delamination, Porosität, Flüssigkeitseinschlüsse, Faltenwurf (Wrinklings)



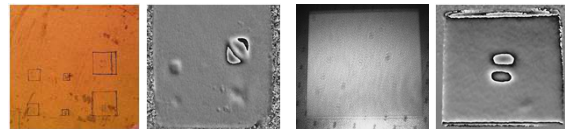
- Sandwichkerne einschließlich Ablösungen, Risse, Flüssigkeits- und Lufteinschlüsse, Fehlklebungen & Hohlräume.



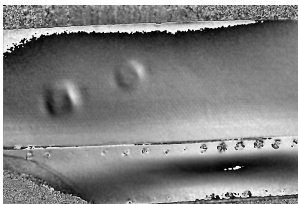
- › Wabenstrukturen einschließlich Schichtablösungen, gebrochene und zerstörte Waben, Flüssigkeitseinschlüsse, Korrosion (Aluminium) & Ablösungen in der Wabenstruktur



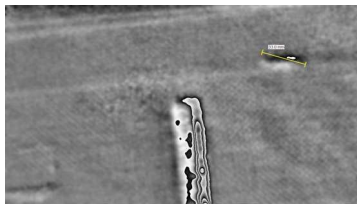
- Druckbehälter (COPVs) einschließlich Delaminationen, Wrinklings und Porosität.
- Beschichtungen und Verbundwerkstoffe, z.B. Kork und Gummi, einschließlich Ablösungen und Kissing Bonds usw.



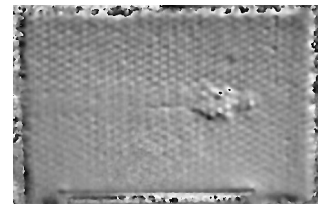
**Impakt Schäden in Rotorblättern Aluminium Honeycomb**



**Fremdkörper in Höhenrudern / Aramid Honeycomb**



**Flüssigkeitseinschlüsse in Solarpanels / CFK-Waben**



**Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**