

**Ein Methodenvergleich –
ZfP an Kohlefaserverbundwerkstoffen mittels
wirbelstrom- und ultraschallbasierender Prüfverfahren**

M. Schulze**, S. Goldbach*, H. Heuer**, N. Meyendorf**

* IMA Dresden, Wilhelmine-Reichard-Ring 4, 01109 Dresden
** Fraunhofer IZFP, Maria-Reiche-Str. 2, 01109 Dresden

Dipl.-Ing. Sabine Goldbach

sabine.goldbach@ima-dresden.de
Tel.: +49 351 8837-2276

Dipl.-Ing. (BA) Martin Schulze

martin.schulze@izfp-d.fraunhofer.de
Tel.: +49 351 26482-40

© Fraunhofer IZFP-D



Inhalt

- **1 CFK Strukturen in Luft- und Raumfahrt / Automobilbau**
 - 1.1 typische Defekte
 - 1.2 Materialeigenschaften von Kohlefaserverbundwerkstoffen
- **2 Prüfequipment / Herausforderungen an das Prüfproblem**
 - 2.1 Ultraschall
 - 2.2 Wirbelstrom
- **3 Messergebnisse**
 - 3.1 Ultraschall
 - 3.2 Wirbelstrom
 - 3.3 Vergleich UT / ET
- **4 Resümee und Ausblick**

© Fraunhofer IZFP-D

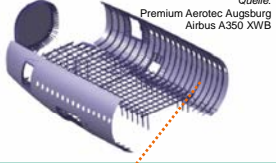

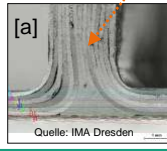
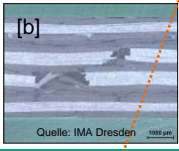
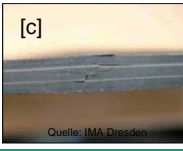
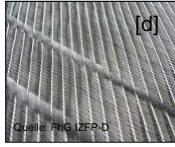
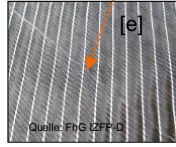



No. 2



1 CFK Strukturen in Luft- und Raumfahrt / Automobilbau

1.1 typische Defekte

Struktur	 <p>Quelle: Premium Aerotec Augsburg Airbus A350 XWB</p>	 <p>Quelle: BMW-Press</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Klebe- und Nietverbindungen zw. verschiedenen Komponenten → Delaminationen / Debonding ▪ Impacts (Vogelschlag etc.) auf Rumpf ▪ Alterung (UV-Strahlung etc.) 	
Komponente	 <p>Quelle: IMA Dresden</p>	 <p>Quelle: IMA Dresden</p>	 <p>Quelle: IMA Dresden</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ [a] Fehlstelle in Stringerverbindungen aufgrund von Fertigungstoleranzen ▪ [b] interlaminarer Faserbruch ▪ [c] makroskopischer Bruch u.a.
Rohgelege	 <p>Quelle: Fraunhofer IZFP-D</p>	 <p>Quelle: Fraunhofer IZFP-D</p>	 <p>Quelle: Fraunhofer IZFP-D</p>	<p>Hauptaugenmerk auf innenliegende Fehler</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ [d] fehlende Bündel ▪ [f] Aufschiebungen ▪ [g] Auffransungen u.a.

1 CFK Strukturen in Luft- und Raumfahrt / Automobilbau

1.1 typische Defekte

- Unterscheidung in **Fertigungsfehler** und den daraus resultierenden **Betriebsschädigungen**

Fertigungsfehler (Gelege, RTM, CFRP)

- Winkelfehler; Ondulationen
- Folienfehler; Gassenbildung
- Fehlerhafte Lagenpositionierung
- Fuzzy Balls; Filamentquerung
- Aufschiebungen; Ausfransungen
- Harzverarmung; Harzansammlungen
- Poren (Volumen); Rillen (Oberfläche)
- Dickenmaß abweichend bzw. schwankend

Betriebsschädigungen (Laminat, Struktur)

- Delaminationen (Oberfläche, Volumen)
- Bruch / Riss im Bauteil
- Debonding

- Je eher ein Fehler im Fertigungsprozess entdeckt wird, desto geringer ist der Verlust in der Wertschöpfungskette
- Die Nachverfolgbarkeit vom Produktionsprozess hin zum Endbauteil ermöglicht die Beurteilung von Schadensbildern und deren Herkunft
- Fehler, welche im Produktionsprozess vermieden werden können, garantieren die Bauteillebensdauer
- Turnusmäßige Inspektion ist dennoch unerlässlich, da vorgeschriebene Inspektionsintervalle in der Luftfahrt vorgeschrieben sind (Automobilbau?!)
- **UT-Inspektion** ist bereits **De-facto-Standard** für die **Luftfahrtinspektion**
- **ET-basierendes ZIP-Verfahren** einsetzbar für die **Produktionsüberwachung?**

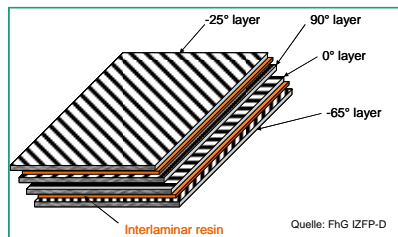
1 CFK Strukturen in Luft- und Raumfahrt / Automobilbau

1.2 Materialeigenschaften von Kohlefaserverbundwerkstoffen

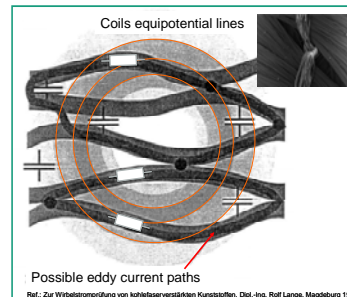
- Anisotropie durch Lagenaufbau (Beugung/Streuung → UT)
- Komplexe Geometrien (Sensoranpassung für UT und ET)
- geringe elektrische Leitfähigkeit:
 $\sigma = 3 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ → vgl. Aluminium: $\sigma = 37,7 \cdot 10^6 \text{ S/m}$
- Richtungsabhängige Leitfähigkeitsverteilung
 → *Lagenseparation* mittels *Wirbelstrom*
- Messungen mit H₂O-Ankopplung am Rohgelege mittels Ultraschall nicht möglich (ET – koppelmittelfrei)
- *Ultraschallprüfung für Delaminationen* prädestiniert



Quelle: Premium Aerotec



Quelle: FHG IZFP-D



Ref.: Zur Wirbelstromprüfung von kohlenfaserverstärkten Kunststoffen, Dipl.-Ing. Rolf Lange, Magdeburg 1997

© Fraunhofer IZFP-D



No. 5



2 Prüfequipment / Herausforderungen an das Prüfproblem

2.1 Ultraschall



Quelle: FHG IZFP-D

Automatisierter Ultraschallscanner



Quelle: FHG IZFP-D

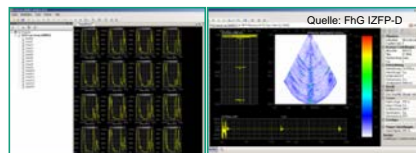
PCUS pro Array US-Frontend



Quelle: FHG IZFP-D

16 Elemente Matrix Array

GUI mit Postprocessing BV-Algorithmen für Kontakt- und Immersionstechnik



Quelle: FHG IZFP-D

© Fraunhofer IZFP-D

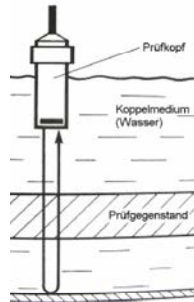


No. 6

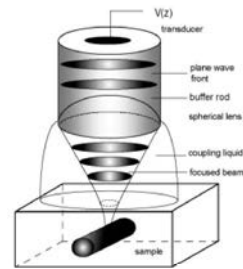


2 Prüfequipment / Herausforderungen an das Prüfproblem

2.1 Ultraschall



Prinzip Tauchttechnik – Doppeldurchschallung



Prinzip Ultraschallmikroskop

© Fraunhofer IZFP-D



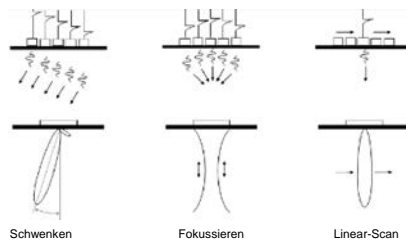
No. 7



2 Prüfequipment / Herausforderungen an das Prüfproblem

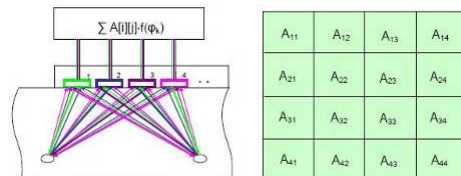
2.1 Ultraschall

Traditionelle Phased Array - Techniken



Quelle: Olympus IMS

Sampling Phased Array - Techniken



Quelle: FHG IZFP-D

Volumendatensatz mit nachträglicher softwarebasierter Algorithmmik (SAFT etc.)

© Fraunhofer IZFP-D

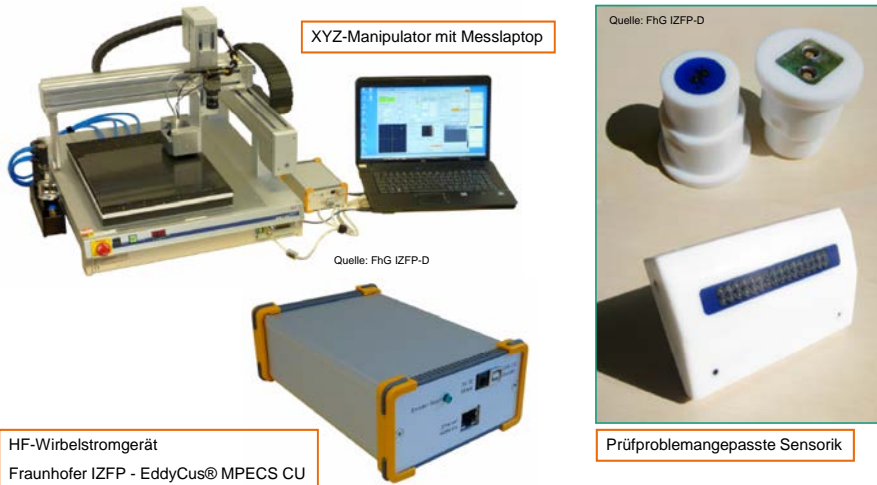


No. 8



2 Prüfequipment / Herausforderungen an das Prüfproblem

2.2 Wirbelstrom



© Fraunhofer IZFP-D



No. 9

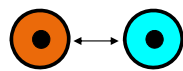


2 Prüfequipment / Herausforderungen an das Prüfproblem

2.2 Wirbelstrom

1. Variation des S / E - Abstandes

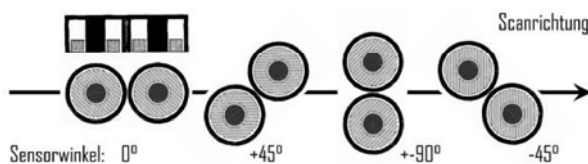
Sender Empfänger



Quelle: FhG IZFP-D



2. Winkelorientierung des Sensors



Quelle: FhG IZFP-D

- Da Anisotropie vorliegt kann mittels Sensordrehung lagensensitiv gemessen werden
- Sensorabstand: 3,5mm
- Sensorwirkbreite: $\leq 1\text{mm}$

© Fraunhofer IZFP-D



No. 10



3 Messergebnisse

3.1 Ultraschall



Quelle: Fachbericht von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, M. Sc. Claudia Ehinger, Dipl.-Ing. (FH) Gerhard Straßer
Automatisierungslösungen bei der Herstellung von Faserverbund-Preforms; mechatroniknews 12/2010

© Fraunhofer IZFP-D

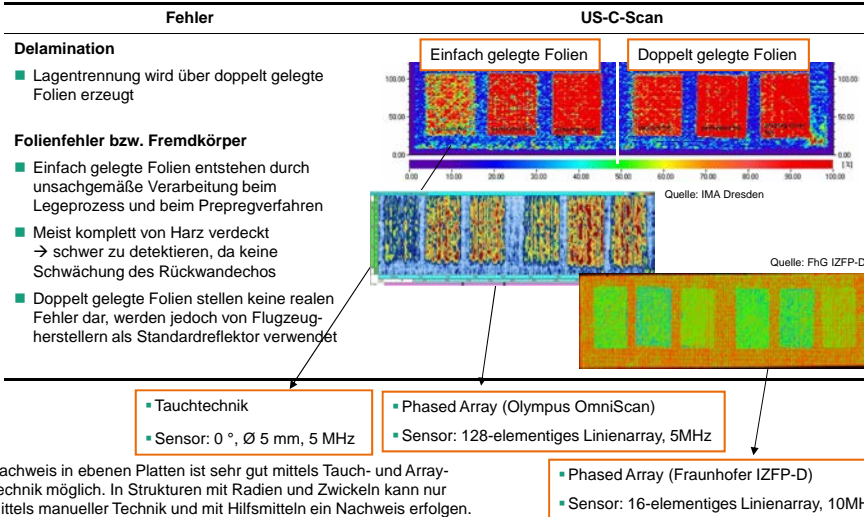


No. 11



3 Messergebnisse

3.1 Ultraschall



© Fraunhofer IZFP-D



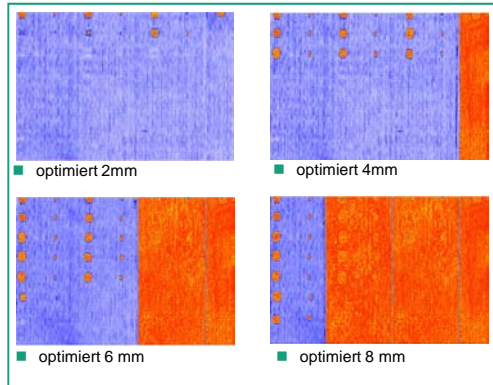
No. 12



3 Messergebnisse

3.1 Ultraschall

Delamination



- Immersion Technique
- Pulse – Echo Technique
- 64 Element Line Array
- **Sampling Phased Array Technique**
- Frequency: 5MHz
- Shot distance: 1mm
- Scan Duration: 4 Minutes

© Fraunhofer IZFP-D



No. 13



3 Messergebnisse

3.1 Ultraschall

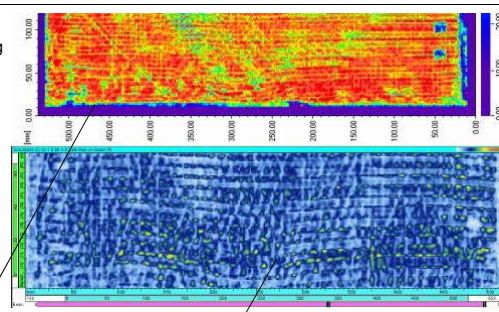
Fehler

US-C-Scan

Ondulationen

- Entstehen durch unsachgemäße Verarbeitung beim Legeprozess und/oder durch örtliche Druckunterschiede
- Ondulationen in Beanspruchungsrichtung zeigen einen Abfall der maximal ertragbaren Kraft und Spannung um 30 %

Quelle: IMA Dresden



- Tauchtechnik
- Sensor: 0°, Ø 5 mm, 5 MHz

- Phased Array
- Sensor: 128-elementiges Linienarray, 5MHz

- Nachweis ist nicht trivial. Sehr starke Ondulationen in allen Richtungen und über mehrere Lagen können nachgewiesen werden, während Ondulationen in nur einer Lage oder auch sehr gleichmäßige Ondulationen schwer nachzuweisen sind.
- **Befinden sich Ondulationen jedoch in den äußeren Lagen, so sind sie visuell gut zu erkennen.**

© Fraunhofer IZFP-D



No. 14



3 Messergebnisse

3.1 Ultraschall

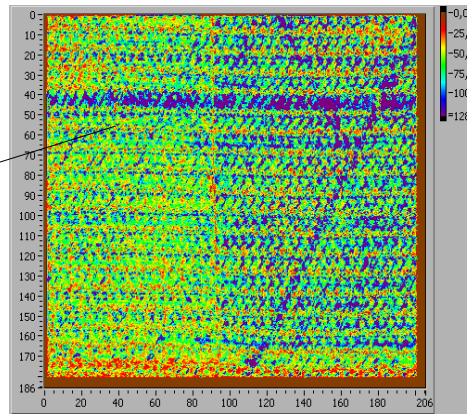
Fehler

US-C-Scan

Fehlende Faserlagen / Gassenbildung

- Entstehen durch unsachgemäße Verarbeitung beim Legeprozess und/oder durch zu hohe Kräfte während des Drapierens um das Werkstück

- Tauchtechnik
- Sensor: 0°, Ø 5 mm, 5 MHz
- Fehlende Bündel in 2. und 3. Lage



Quelle: FhG IZFP-D

- Fehlende Faserlagen können bei ausreichend großer Rückwandechoschwächung erkannt werden. Es ist jedoch eine Mindestfehlerbreite von ca. 5mm erforderlich.

© Fraunhofer IZFP-D

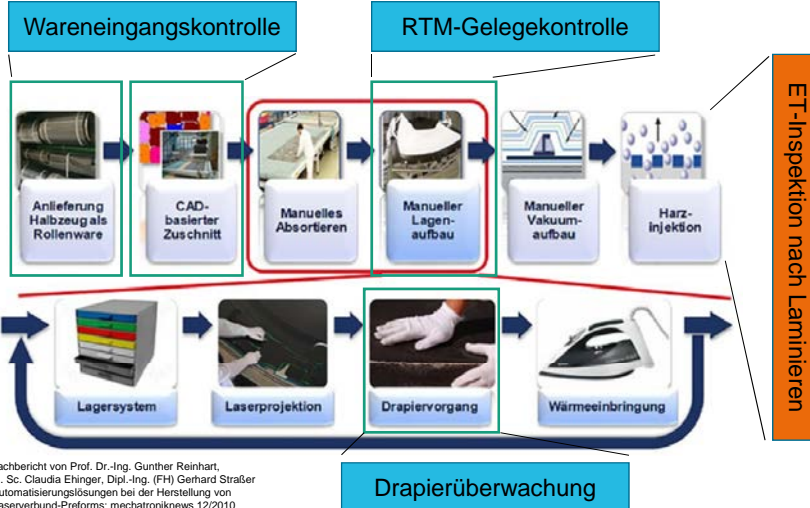


No. 15



3 Messergebnisse

3.2 Wirbelstrom



Quelle: Fachbericht von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, M.Sc. Claudia Ehinger, Dipl.-Ing. (FH) Gerhard Straßer
Automatisierungslösungen bei der Herstellung von Faserverbund-Preforms; mechatroniknews 12/2010

© Fraunhofer IZFP-D


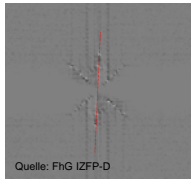
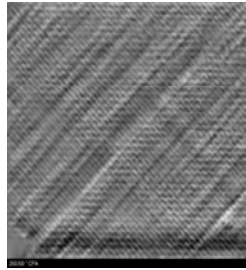



No. 16



3 Messergebnisse

3.2 Wirbelstrom

Fehler	ET-C-Scan
<p>Winkelfehler</p> <ul style="list-style-type: none"> Entstehen durch unsachgemäße Verarbeitung beim Legeprozess und/oder durch örtliche Druckunterschiede <p>  25° - Sensororientierung </p> <p>  Quelle: FhG IZFP-D 2D-FFT </p>	<p>  0° Referenzlage </p> <p>  3,5° Winkelversatz </p> <p>Quelle: FhG IZFP-D</p>
<ul style="list-style-type: none"> Winkelfehler sind innerhalb der Toleranzgrenze von 3° sehr präzise nachweis- und bewertbar mittels 2D-FFT Algorithmen 	

© Fraunhofer IZFP-D




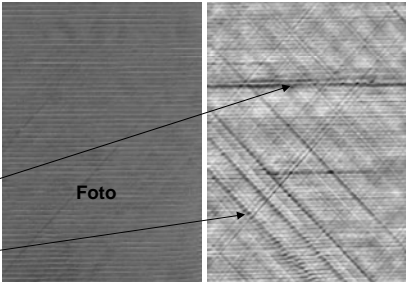


No. 17



3 Messergebnisse

3.2 Wirbelstrom

Fehler	ET-C-Scan
<p>Fehlende Bündel / Gassen im Gelege</p> <ul style="list-style-type: none"> Fehlende Bündel entstehen durch Maschinenfehler während der Produktion Gassen durch Toleranzen beim Legeprozess <p>  0° - Sensororientierung </p> <p>  </p> <p>  </p>	<p>  Foto </p> <p>Quelle: FhG IZFP-D</p>
<ul style="list-style-type: none"> Fehlende Bündel und Gassen in Mehrlagensystemen vermindern die lokale Leitfähigkeit Mittels angepasster Sensororientierung kann das Matching auf eine bestimmte Lage verbessert werden Notwendigkeit von Hochfrequenzwirbelstromsystemen aufgrund der geringen Leitfähigkeit 	

© Fraunhofer IZFP-D



No. 18



3 Messergebnisse


3.2 Wirbelstrom

Fehler

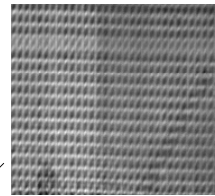
ET-C-Scan

Fehlende Bündel im CFRP

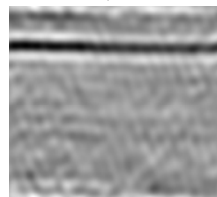
- Fehlende Bündel entstehen durch Maschinenfehler während der Produktion

 0° - Sensororientierung

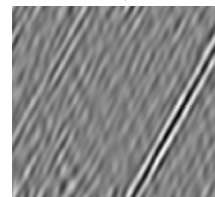
Fehlerextraktion durch richtungsabhängiges Windowing im Bildbereich und anschließende Rücktransformation in den Zeitbereich



Quelle: FhG IZFP-D



0°-Lage



+45°-Lage

© Fraunhofer IZFP-D



No. 19



3 Messergebnisse


3.2 Wirbelstrom

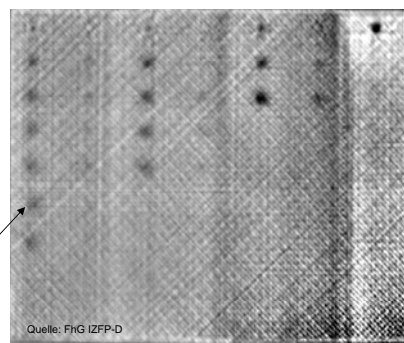
Fehler

ET-C-Scan

Delaminationen im CFRP

- Kreisscheibenreflektoren für US-Kalibrierung
- Testfehler PE-Folie (500µm) in Stufenkeil (8,6,4,2 mm) mit Abmessungen von 6x6 mm² und 2x2 mm²

 +45° - Sensororientierung



Quelle: FhG IZFP-D

- Detektion von dielektrischen Folien (6x6 mm²) mittels HF-Wirbelstrom sicher möglich
- Fehler können ansatzweise anhand ihrer Amplitude den verschiedenen Lagen zugeordnet werden
- → Mehrfrequenzalgorithmen...

© Fraunhofer IZFP-D

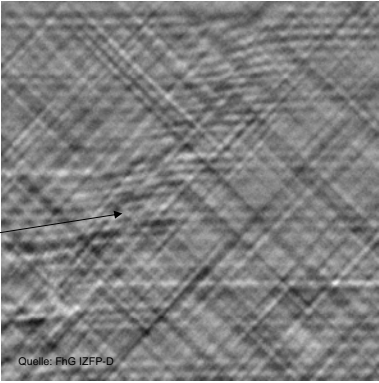


No. 20



3 Messergebnisse

3.2 Wirbelstrom

Fehler	ET-C-Scan
<p>Ondulationen im CFRP</p> <ul style="list-style-type: none"> Entstehen durch unsachgemäße Verarbeitung beim Legeprozess und/oder durch örtliche Druckunterschiede beim Drapieren <p>0° - Sensororientierung</p> <p>Ondulation in der 3. Lage → 5-lagiges Gelege</p>	 <p>Quelle: FRG IZFP-D</p>
<ul style="list-style-type: none"> Ondulationen im gesamten Volumen können sicher detektiert werden Die Bewertung der Tiefeninformation erweist sich noch als schwierig, jedoch kann aufgrund der Lagenverläufe auf die Fehlerlage zurückgeschlossen werden 	

© Fraunhofer IZFP-D



No. 21



3 Messergebnisse

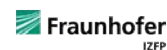
3.3 Vergleich UT / ET

	Ultraschall	Wirbelstrom
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> Automatisierbares Verfahren exakte Aussagen über Tiefenlage der Fehler möglich Impacts mit Schädigung der Rückwand sicher detektierbar Prädestiniert für Dickenbewertung Zertifiziertes Verfahren für die Inspektionsroutinen der Luftfahrt 	<ul style="list-style-type: none"> Automatisierbares Verfahren Kein Koppelmedium nötig → Rohlegeinspektion möglich Winkelfehler als Werkstoffparameter im RTM-Prozess kann sicher überwacht werden Höhere Wertschöpfung durch frühere Produktionskontrolle
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> Koppelmedium erforderlich → Messungen nur an Laminaten Keine Fehlerbewertung an unverharteten Gelegen möglich 	<ul style="list-style-type: none"> Noch nicht für Luftfahrt und Automotive zertifiziert - > Normungsarbeit DGZfP Tiefenbewertung noch nicht sicher möglich Prüfverfahren an CFK-Komponenten ist beim Endanwender noch nicht etabliert

© Fraunhofer IZFP-D



No. 22



4 Resümee und Ausblick

- Datenfusion von Ultraschall und Wirbelstromdaten zur lückenlosen Produktions- und Betriebs-sicherheitsüberwachung
 - UT- und ET basierende Prüfverfahren können sich ideal ergänzen!
 - ET – Produktionsüberwachung; UT – Betriebsicherheitsüberwachung
 - Implementation von wirbelstrombasierter Prüftechnik in die Gelegemaschinen, Zuschneidetische, Legeroboter etc.
 - In der koppelmittelfreien Überwachung der Winkellagentreue beim RTM-Prozess besteht großes Nachfragepotential seitens der Industrie
- Erkenntnisgewinn über Fehlerursachen und deren Schädigungspotential möglich!

**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!**

