

# Bestimmung der Porosität von Kohlenstofffaser-Verbundwerkstoffen mit Ultraschall ohne Rückwandecho

Ute RABE<sup>1</sup>, Ines VEILE<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken

Kontakt E-Mail: ute.rabe@izfp.fraunhofer.de

## Kurzfassung

Kohlenstofffaser-Verbundwerkstoffe eignen sich aufgrund ihres geringen Gewichts bei gleichzeitig hoher Steifigkeit sehr gut für Leichtbaukonstruktionen im Transportwesen. Um das Leichtbaupotenzial voll auszuschöpfen und kosteneffizient zu produzieren, kann der Werkstoff hinsichtlich seiner Eigenschaften wie z.B. Faserlänge, Faserrichtung, Faseranteil und Polymermatrix genau an die Anforderungen angepasst werden. Allerdings muss im Rahmen einer Qualitätskontrolle sichergestellt werden, dass keine Produktionsfehler auftreten, die zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften führen. Ein häufig auftretendes Problem ist Porosität, d.h. Luft- oder Gaseinschlüsse durch unvollständige Infiltration des Polymerharzes zwischen die Fasern oder Rovings.

Zerstörungsfreie Prüfverfahren, die sich zum Nachweise von Porosität eignen, sind Röntgen-Computertomografie (CT), Thermografie und Ultraschall. Die Röntgen CT wird vor allem als Referenzverfahren verwendet, da sie es erlaubt, einzelne Poren abzubilden, und deren Form, Lage und Anzahl quantitativ zu bestimmen. Allerdings ist die Entnahme von Proben notwendig, deren maximal erlaubte Abmessungen mit der erforderlichen Ortsauflösung immer kleiner werden. Aktive Thermografie ist als integrale Prüfmethode in der Entwicklung. Neben der Röntgen-CT sind Ultraschallmethoden am weitesten verbreitet. Üblicherweise wird die Schwächung des Rückwandechos ausgewertet. Diese Methode kommt jedoch an ihre Grenzen, wenn das Bauteil gekrümmt oder sehr dickwandig ist, oder wenn die Porosität so hoch ist, dass kein Rückwandecho mehr messbar ist. Um eine quantitative Bestimmung der Porosität auch ohne Rückwandecho zu ermöglichen, wurde eine Signalverarbeitungsmethode entwickelt, die auf Ultraschall-A-Bilder in einem Zeitintervall direkt nach dem Eintrittsecho angewandt wird. Es wurde ein konventionelles Ultraschall-Prüfsystem für Tauchtechnik in Wasser mit Einzelschwinger verwendet. Mit Hilfe der Signalverarbeitung und einer anschließenden statistischen Auswertung der Signale konnte die Porosität auch ohne Rückwandecho quantitativ bestimmt werden. Wie des Weiteren gezeigt wird, konnten mit einem fokussierenden Prüfkopf mit 25 MHz Mittenfrequenz Daten gewonnen werden, die eine tiefenabhängige Bewertung der Porosität erlauben.

---

# Bestimmung der Porosität von Kohlenstofffaser-Verbundwerkstoffen mit Ultraschall ohne Rückwandecho

---

Seminar des FA Ultraschallprüfung der DGZFP  
Charakterisierung von Material- und Fehlereigenschaften mittels Ultraschall  
6.-7. November 2017 in Berlin

Ute Rabe, Ines Veile



Fraunhofer IZFP  
Campus E3 1  
66123 Saarbrücken / Germany  
[info@izfp.fraunhofer.de](mailto:info@izfp.fraunhofer.de)  
[www.izfp.fraunhofer.de](http://www.izfp.fraunhofer.de)

© Fraunhofer IZFP



1



---

## Inhalt

---

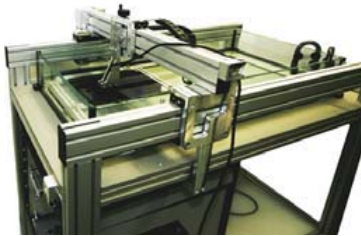
- Motivation
- Entwicklung eines ersten Algorithmus zur Bestimmung der Porosität anhand von Probensatz 1
- Probensatz 2 - Erweiterung der Vorgehensweise
- Ansatz zur tiefenabhängigen Bestimmung der Porosität mit Ultraschall
- Zusammenfassung

© Fraunhofer IZFP

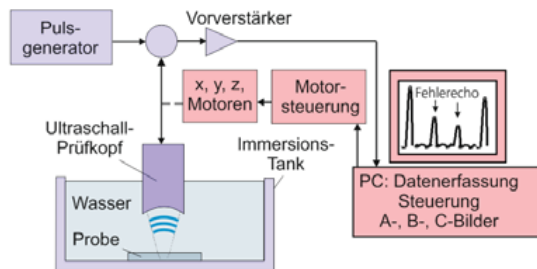
2



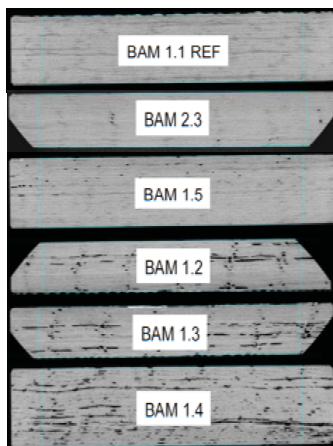
## Ultraschallprüfung in Tauchtechnik Quantitative Bestimmung der Porosität mit Ultraschall



- Bestimmung der Porosität über Ultraschall-Schwächung ist etabliertes Verfahren
- Bislang kein Verfahren für dickwandige, stark streuende und komplex geformte Bauteile
- Es wird ein Verfahren benötigt, das ohne Rückwändecho auskommt

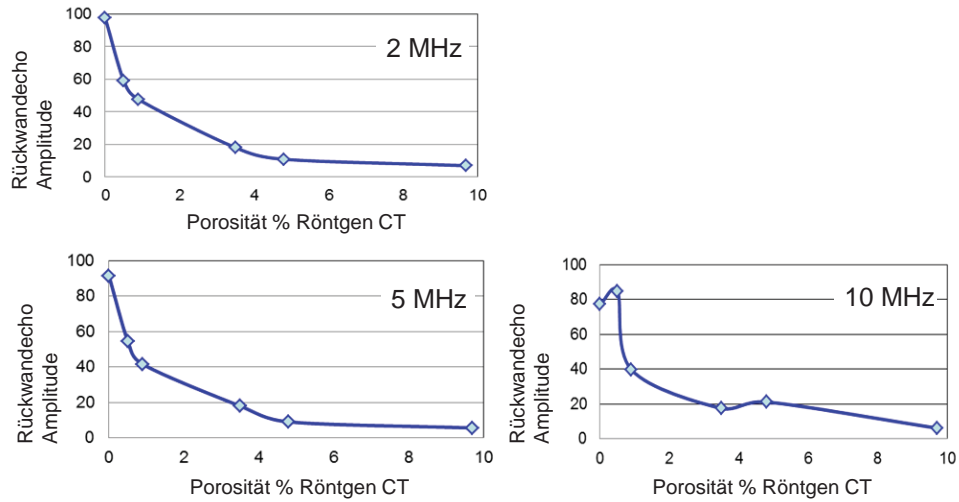


## Probensatz 1 mit verschiedenen Porositätswerten CT-Daten, ermittelt bei der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), als Referenz

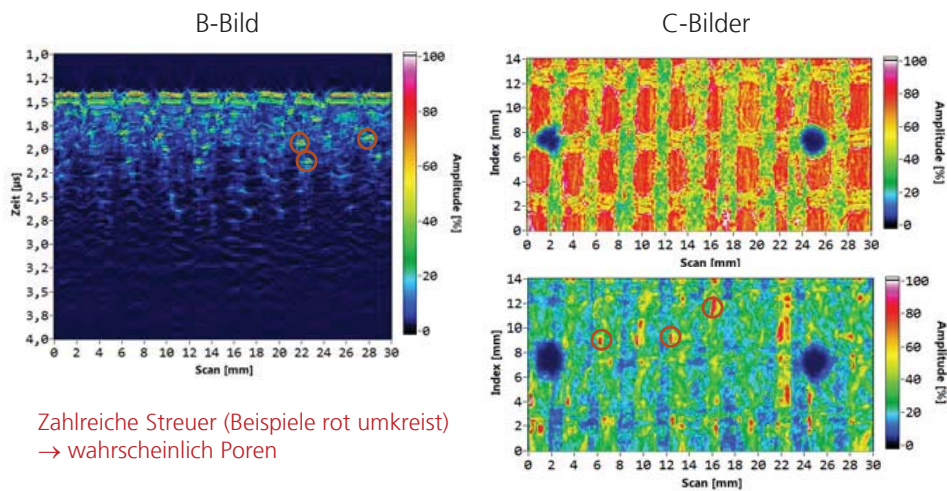


Probe	Porosität, %	Dicke, mm
1.1	0	6,3
2.3	0,5	4
1.5	0,9	6,4
1.2	3,5	4
1.3	4,8	4
1.4	9,7	6,3

## Probensatz 1 mit verschiedenen Porositätswerten CT-Daten als Referenz, Überprüfung der US-Schwächungsmethode

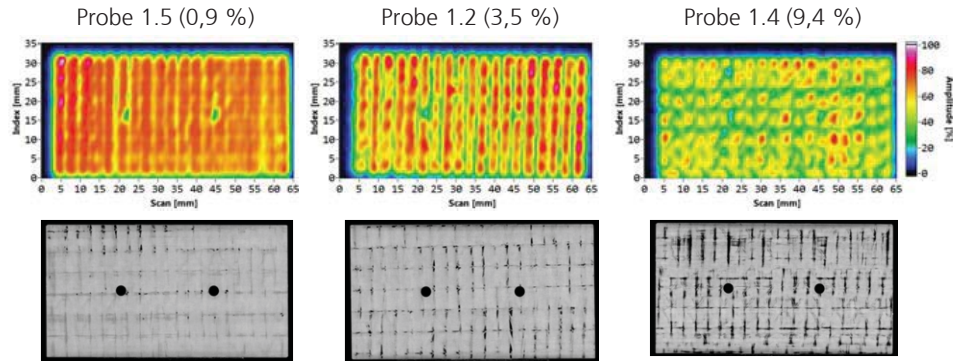


## Porosität von CFK-Proben, US-Tauchtechnik, 25 MHz Hochauflösender Scan einer Probe 1.2 mit 3,5 % Porosität Puls-Echo-Verfahren



## Porositätsbestimmung von CFK-Proben, Probensatz 1

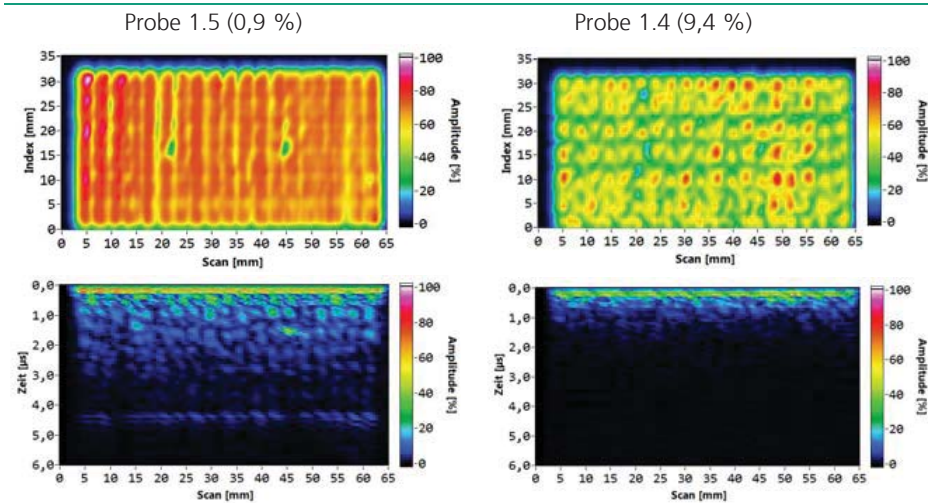
US-C-Bilder 5 MHz (oben)  
Röntgen-CT-Schnittbilden (unten)



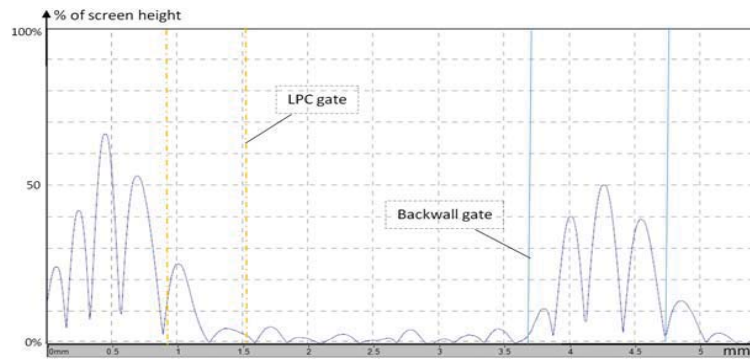
- Die Bilder zeigen die Amplitude des Oberflächenechos der Proben
- Man erkennt die Gewebestruktur
- Die Probe mit der geringsten Porosität zeigt das Echo mit der größten Homogenität – die Probenoberfläche ist am glattesten

## Porositätsbestimmung von CFK-Proben, Probensatz 1

US-C-Bilder 5 MHz (oben)  
US-B-Bilder 5 MHz (unten)



## Porositätsbestimmung von CFK-Proben, Probensatz 1 Filterung der Daten mit Frequenz entsprechend Linear Predictive Coding (LPC) - Algorithmus

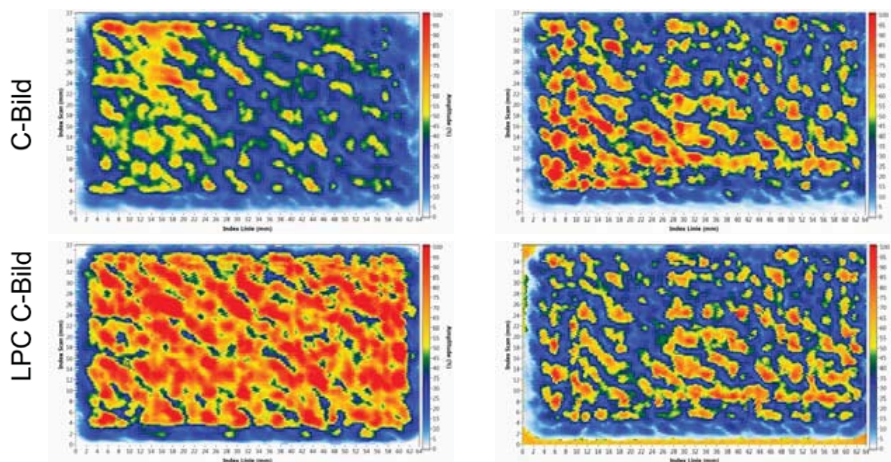


A. Lozak, et al., Phase statistics and spectral analysis of ultrasonic signals for CFRP component assessment, 7<sup>th</sup> European Workshop on Structural Health Monitoring, July 8-11, 2014, La Cité, Nantes, France

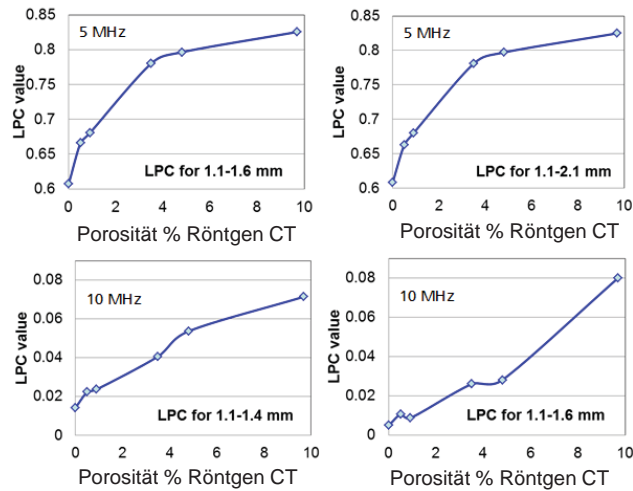
## Porositätsbestimmung von CFK-Proben, Probensatz 1 C-Bilder und LPC-C-Bilder von zwei Proben mit unterschiedlicher Porosität

Probe 1.5 (0,9 % Porosität)

Probe 1.4 (9,4 % Porosität)

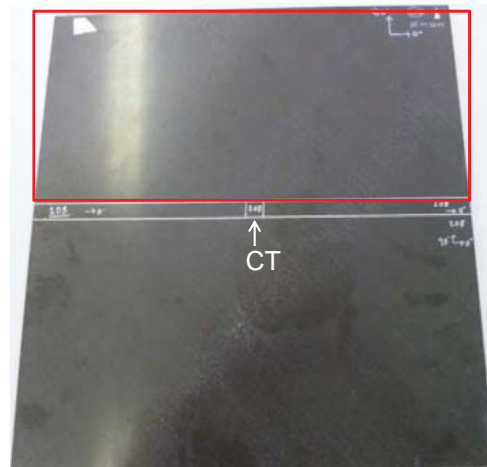


## Porositätsbestimmung von CFK-Proben, Probensatz 1 LPC-Wert gegen Porosität



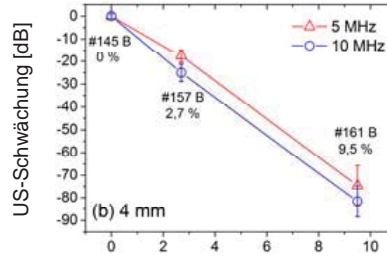
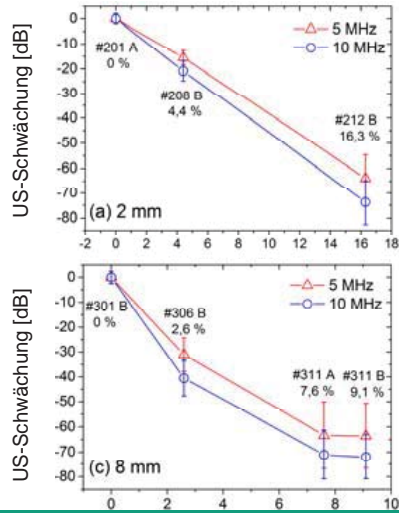
## Porositätsbestimmung von CFK-Proben, Probensatz 2 Bezeichnung der Proben, Dicke, Porosität

Probe	Dicke, mm	Porosität, %
301	8,4	0*
306	8,6	2,6
311	8,6	4,5
133	4,3	0*
145	4,2	0*
157	4,2	2,7
161	4,3	9,5
201	2,0	0*
208	2,1	4,4
212	2,2	16,3

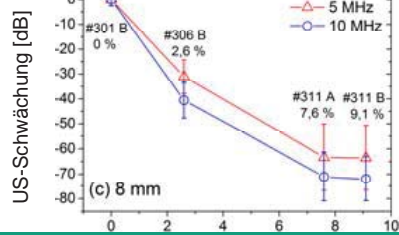


Bestimmung der Porosität mit CT  
anhand kleiner Probenausschnitte  
von ca. 1 cm Kantenlänge

## Porositätsbestimmung von CFK-Proben, Probensatz 2 Ultraschallschwächung für die Proben jeweils gleicher Dicke

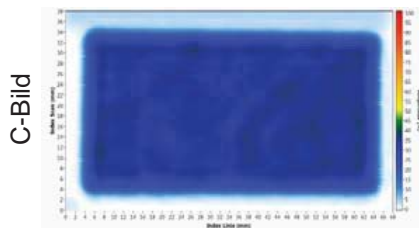


Horizontale Achse:  
Porosität gemäß CT [%]

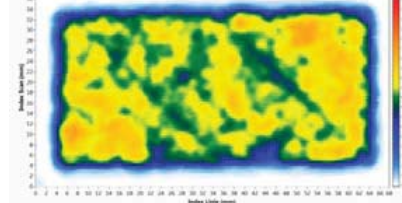
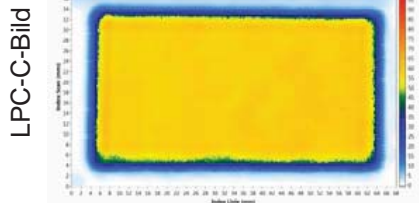
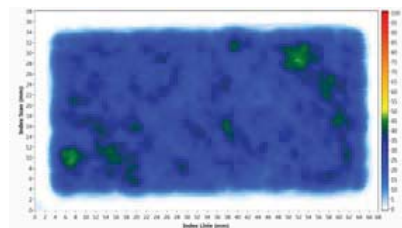


## Porositätsbestimmung von CFK-Proben, Probensatz 2 C-Bilder und LPC-C-Bilder

Probe 145 B (0 % Porosität)



Probe 161 B (9,4 % Porosität)

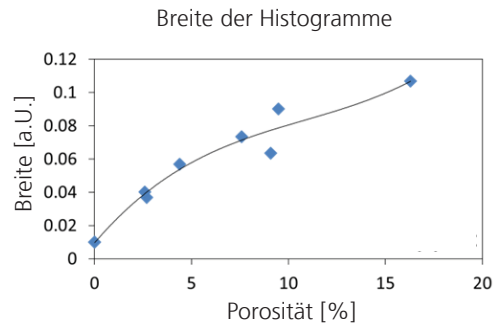
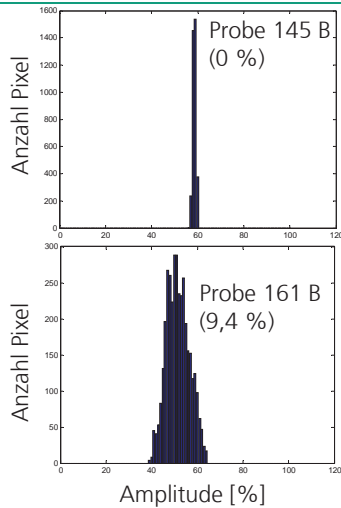




## Porositätsbestimmung von CFK-Proben

⇒ Histogramme der LP-C-Bilder

⇒ Breite der Histogramme bei 50% des Maximums

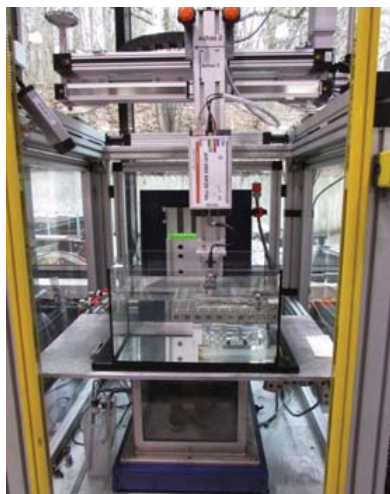


- Berechnung eines Histogramms zu jedem LP-C-Bild
- ⇒ statistische Verteilung der Amplitudenwerte
- Auftragen der Breite der Histogramme bei 50% ihrer Maximalamplitude
- ⇒ gute Korrelation zur Porosität

## Tiefenaufgelöste Porositätsbestimmung von CFK-Proben

Messungen in Tauchtechnik bei 25 MHz Frequenz

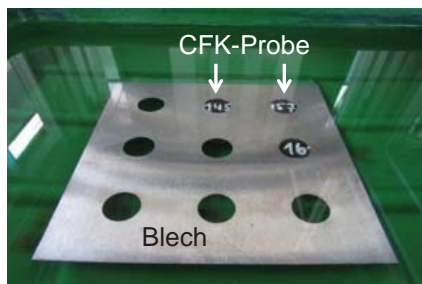
Konstanter Abstand Prüfkopf ↔ Oberfläche CFK-Proben



■ Prüfkopf IAP-F25.6.1

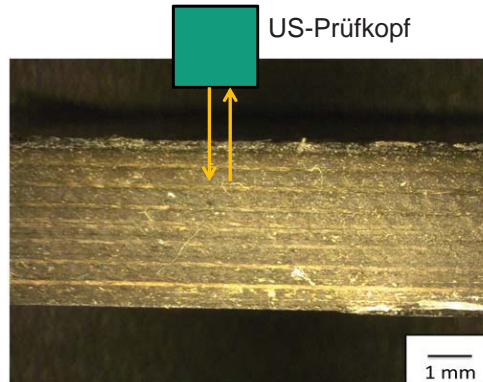
■ 25 MHz Frequenz

■ Aluminiumblech mit Bohrungen zur Halterung der Proben



## Tiefenaufgelöste Porositätsbestimmung von CFK-Proben Ultraschall-Laufzeit durch eine Lage

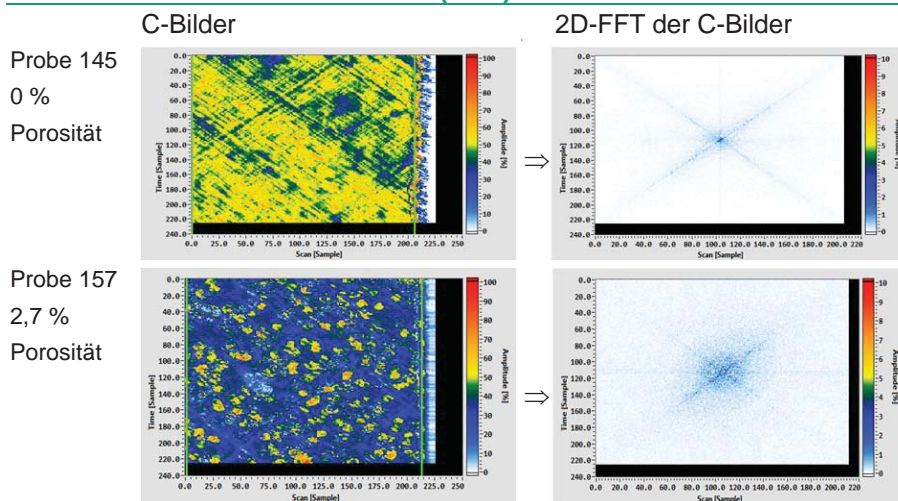
- Dicke einer CFK-Lage  
ca. 0,125 mm
- Schallgeschwindigkeit  
 $v \approx 3000$  m/s
- Laufzeit  $\Delta t$  (Puls-Echo)  
durch eine Lage  
 $\Delta t \approx 83$  ns
- Fokus ca. 1,5 mm im  
CFK-Material
- C-Bild Intervall  $< \Delta t$



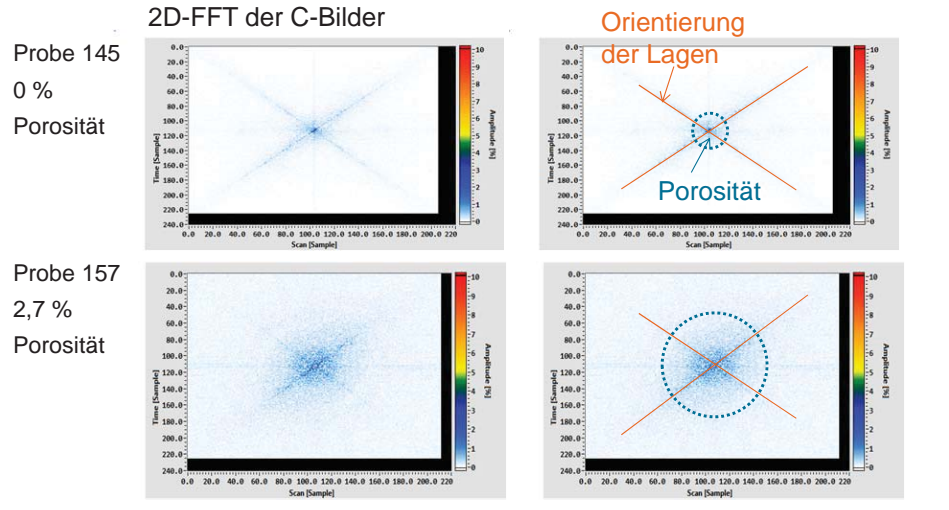
D.K. Hsu, D. Fei, Z. Liu: Ultrasonically Mapping the Ply Layup of Composite Laminates, Materials Evaluation, 2002, p. 1099  
2D-FFT von C-Bildern  $\Rightarrow$  Orientierung der Lagen

20

## Tiefenaufgelöste Porositätsbestimmung von CFK-Proben C-Bilder der ersten Lage unter der Oberfläche 2D-Fouriertransformation (FFT) der C-Bilder



## Tiefenaufgelöste Porositätsbestimmung von CFK-Proben 2D-Fouriertransformation (FFT) der C-Bilder



## Zusammenfassung

- Porosität von CFK ist ein wichtiger Qualitätsparameter. Bei dicken Bauteilen oder hoher Porosität versagt die gängige Methode (Schwächung des Rückwandechos)
- Ein Prototyp zur Messung der Porosität mit Ultraschall ohne Rückwandecho wurde aufgebaut.
- Die LPC-Methode wurde anhand von Probensatz 1 entwickelt und implementiert
- Zur Anwendung an Probensatz 2 wurde die LPC-Methode um eine statistische Auswertung erweitert.
- Erste Ansätze zur Messung der Tiefenabhängigkeit der Porosität durch 2D-FFT von C-Bildern einzelner CFK-Lagen

*H.J. Kurz, U. Rabe: Porosity determination of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) in aviation applications using ultrasound without a back wall echo, 19<sup>th</sup> World Conference on Non-Destructive Testing, Munich, 2016*

---

## Danksagung

---

A. Schwabe: US-Messungen bei 25 MHz und Auswertung

H. Ollmann: Labview-Programmierung (LPC und 2D-FFT)

J. Kurz: Leitung des IZFP-Projektes im Rahmen des Kooperationsprojektes RoCk

Förderung im Rahmen des Projektes  
Robuste CFK Gesamtprozesskette (RoCk).

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages