

Zerstörungsfreie Charakterisierung und Prüfung faserverstärkter Kunststoffkomposite mit akustischen Verfahren

Ute RABE¹, Thomas B. HELFEN^{1,2}, Miriam WEIKERT¹, Sigrun HIRSEKORN¹,
Hans-Georg HERRMANN¹, Christian BOLLER^{1,2}

¹Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken

²Lehrstuhl für zerstörungsfreie Prüfung und Qualitätssicherung LZPQ,
Universität des Saarlandes, Saarbrücken

Kurzfassung

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffkomposite (CFK) sind wegen ihrer hervorragenden mechanischen Eigenschaften bei gleichzeitig geringem spezifischem Gewicht für viele industrielle Anwendungen, z.B. im Flugzeug- und Automobilbau sowie der Freizeitindustrie, von zunehmender Bedeutung. Als Konstruktionswerkstoffe werden hauptsächlich C-Langfasern auf Polyacrylnitril-Basis (PAN) in einer duroplastischen oder thermoplastischen Polymermatrix eingesetzt. Der Gewebe- und Schichtaufbau bestimmt die Anordnung der lasttragenden Fasern und damit die elastische Anisotropie des Verbundwerkstoffs. Eine genaue Kenntnis der elastischen Konstanten, die bei Geweben auch lastabhängig sein können, ist für Anwendung und Prüfung eine Grundvoraussetzung. Zwei verschiedene geschichtete Lamine aus 2D Geweben mit Polyphenylsulfid- (PPS) bzw. Epoxid-Matrix wurden mit Hilfe einer Kombination von Ultraschall-Laufzeitmessungen und Resonanzanalyse charakterisiert. Zur Fehlerprüfung, d.h. zur lokalen Detektion von Schädigungen in Form von Delaminationen, Poren und Polymeragglomerationen wurden Ultraschallprüfung in Tauchtechnik und Röntgen-Computertomographie (CT) eingesetzt. Ein Satz von CF-PPS Proben wurde im Ausgangszustand und nach Ermüdung untersucht. Die Proben wurden einer zyklischen Biegebeanspruchung im Ultraschallfrequenzbereich mit einem Verhältnis von Unter- zu Oberspannung von $R = 0,35$ und einer Schwingzahl $N > 108$ ausgesetzt. Die Resonanzspektroskopie zeigte für alle Proben eine globale Abnahme der ersten Biegeresonanzfrequenz und damit des Elastizitätsmoduls. Mit Hilfe der Röntgen-CT und der Ultraschall-Fehlerprüfung konnten verschiedene durch die Ermüdung induzierte Schadenstypen nachgewiesen werden.

Motivation



Airbus A350
www.airbus.com

- Angestrebte Lebensdauer von mehr als 30 Jahren
- Unzureichende Kenntnis des Ermüdungsverhaltens

- Konservative dauerfeste Auslegung
- Potential zur Gewichtsreduzierung wird verringert



Genauere Studie der Ermüdungseigenschaften



Gemeinschaftsprojekt mit **JK** der TU Kaiserslautern und dem Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung und Qualitätssicherung der



Windkraftanlage
www.mainpost.de

© Fraunhofer

Symposium Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung
19. November 2013, Berlin



Fraunhofer
IZFP

Inhalt

- Ultraschall-Ermüdung und Online Charakterisierung
 - Ultraschall-3-Punkt Biegevorrichtung zur Beanspruchung von Kohlenstofffaser-Kompositen (CFK) bei sehr hohen Lastwechselzahlen
 - Online-Charakterisierung: In-situ Messverfahren während der Wechselbeanspruchung der Proben
- Bestimmung der elastischen Konstanten des CFK-Materials
- Offline-Charakterisierung: Untersuchung der 3-Punkt-Biegeproben vor und nach der Ermüdung mit zerstörungsfreien Prüfverfahren
 - Röntgen-Computertomografie
 - Ultraschallprüfung
 - Resonanzanalyse

© Fraunhofer

Symposium Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung
19. November 2013, Berlin



Fraunhofer
IZFP

Ultraschall Ermüdung und Probencharakterisierung

3-Punktbiegesystem mit Online-Überwachung

Beanspruchungseinheit $f = 20 \text{ kHz}$

CFK-Probe

Thermokamera

Laservibrometer



Mikrofon

Offline-Methoden zur Probencharakterisierung

- Ultraschall
- Röntgen Computertomographie
- Mikroskopie
- Thermographie

Charakterisierung im Ausgangszustand

Charakterisierung nach der Beanspruchung

Signalanalyse

© Fraunhofer

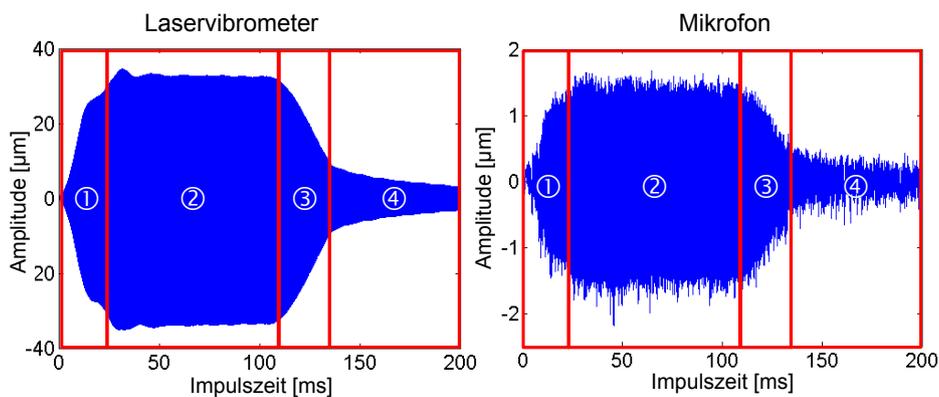
Symposium Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung
19. November 2013, Berlin



Fraunhofer
IZFP

Zeitsignale der Online-Messung

$N = 8,3 \cdot 10^5 (= 0,3 \% N_f)$, $N =$ Beanspruchungszyklen, $N_f =$ Bruchlastspielzahl



④ Auslaufen der Amplitude

Lokale Schwingungsamplitude
in der Mitte der Probe

Schallabstrahlung der Probe,
Ermüdungseinheit, Luftkühlung etc.

© Fraunhofer

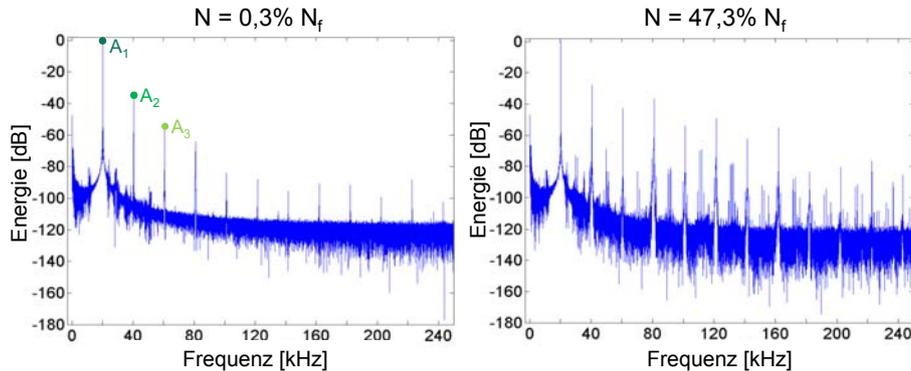
Symposium Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung
19. November 2013, Berlin



Fraunhofer
IZFP

Fast Fourier Transform (FFT) des Vibrometer-Zeitsignals

N = Beanspruchungszyklen, N_f = Bruchlastspielzahl



➔ Ansteigende Nichtlinearität mit steigender Zyklenzahl

Klirrfaktor der höheren Harmonischen

$$K[\%] = 100 \cdot \sqrt{\frac{A_2^2 + A_3^2 + \dots}{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + \dots}}$$

A_i = Amplitude der i-ten Harmonischen

© Fraunhofer

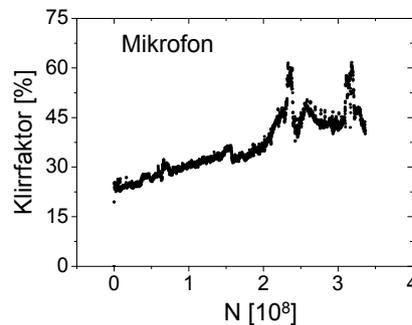
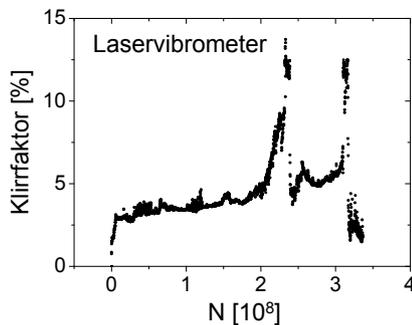
Symposium Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung
19. November 2013, Berlin



Fraunhofer
IZFP

Klirrfaktor, berechnet aus Harmonischen des Zeitsignals

CF-PPS



- Zunahme des Klirrfaktors mit zunehmender Anzahl von Lastzyklen N (Nichtlineare Effekte aufgrund von Rissen und Delaminationen?)
- Starker Anstieg des Klirrfaktors mit anschließendem steilem Abfall (Öffnen von Delaminationen?)

U. Rabe, T. Helfen, M. Weikert, S. Hirsekorn, H.-G. Herrmann, C. Boller, D. Backe, F. Balle, D. Eifler, POMA, Vol. 16, 045004 (2012)

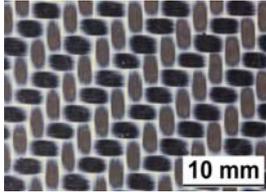
© Fraunhofer

Symposium Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung
19. November 2013, Berlin

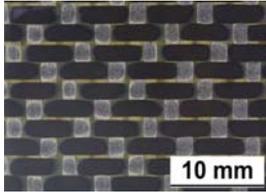


Fraunhofer
IZFP

Probenmaterial



2d Gewebe mit Polyphenylsulfid (PPS) Matrix



2d Gewebe mit Epoxid Matrix



Gulfstream G650

Tepex® dynalite 207-C200/50 % (Bond Laminates)



Tiger Eurocopter

Hexcel/M18/1/43%220H4/AS4C-3K/1230mm

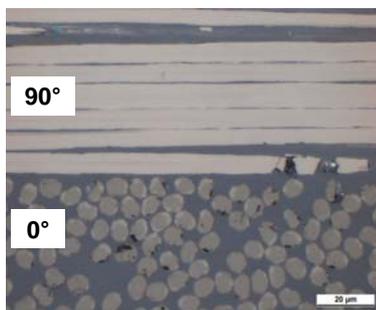
© Fraunhofer

Symposium Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung
19. November 2013, Berlin

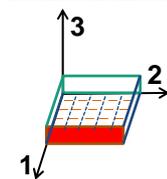
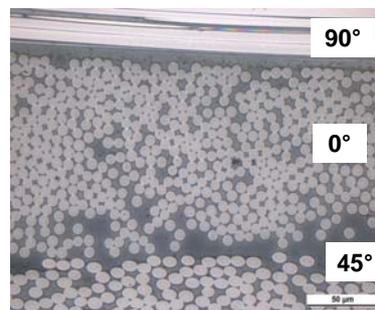


Lichtmikroskopie

PPS CFK



Epoxid CFK



Dipl.-Ing. Matthias Goebel

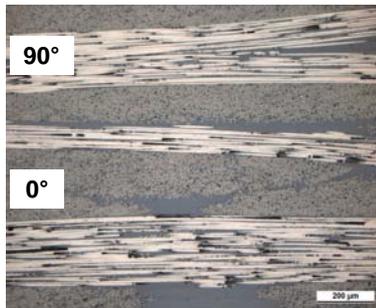
© Fraunhofer

Symposium Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung
19. November 2013, Berlin

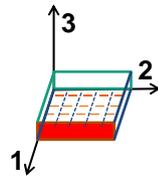
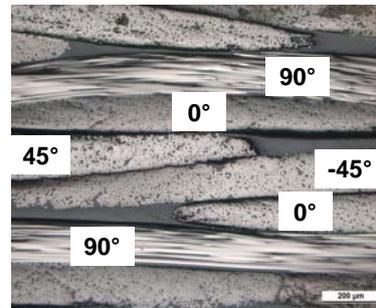


Lichtmikroskopie

PPS CFK



Epoxid CFK



200 µm

200 µm

Dipl.-Ing. Matthias Goebel

© Fraunhofer

Symposium Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung
19. November 2013, Berlin



Elastische Konstanten und Ultraschallausbreitung

Spannungen σ_{ij} , Dehnungen ε_{kl} , Hooke'sches Gesetz

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl}$$

Orthorhombische Symmetrie – 9 elastische Konstanten 2. Ordnung

$$c_{nm} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{pmatrix}$$

Matrix-Schreibweise

$$\begin{aligned} 11 &\rightarrow 1 & 23 &= 32 \rightarrow 4 \\ 22 &\rightarrow 2 & 13 &= 31 \rightarrow 5 \\ 33 &\rightarrow 3 & 12 &= 21 \rightarrow 6 \end{aligned}$$

© Fraunhofer

Symposium Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung
19. November 2013, Berlin



Elastische Konstanten und Ultraschallausbreitung

3-dimensionale elastische Wellengleichung in Komponentenschreibweise

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = c_{ijkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_l}$$

Ebene Welle

$$\vec{u} = \vec{u}_0 e^{i(\omega t - \vec{k}\vec{x})} = \vec{u}_0 e^{i(\omega t - k_x x - k_y y - k_z z)}$$

Christoffel-Gleichung:

$$(c_{ijkl} k_j k_l - \delta_{ik} \omega^2 \rho) u_{0k} = 0$$

Lösungen: 3 Moden, Phasengeschwindigkeit und Polarisation hängen von der Richtung des Wellenvektors $\vec{k} = (k_x, k_y, k_z)$ ab

Christoffel-Gleichung für Orthorombisches System

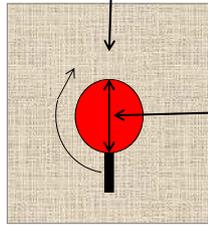
$$\begin{bmatrix} c_{11}n_x^2 + c_{66}n_y^2 + c_{55}n_z^2 & (c_{12} + c_{66})n_x n_y & (c_{13} + c_{55})n_z n_x \\ (c_{12} + c_{66})n_x n_y & c_{66}n_x^2 + c_{22}n_y^2 + c_{44}n_z^2 & (c_{44} + c_{23})n_y n_z \\ (c_{13} + c_{55})n_z n_x & (c_{44} + c_{23})n_y n_z & c_{55}n_x^2 + c_{44}n_y^2 + c_{33}n_z^2 \end{bmatrix} - \frac{\rho \omega^2}{k^2} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = 0$$

n_x, n_y, n_z Richtungskomponenten von

v_x, v_y, v_z

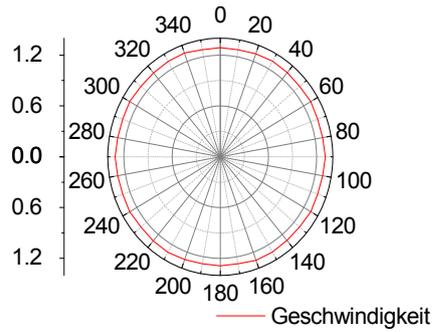
Prüfung der Symmetrie mit Transversalwellen

Ultraschallprüfkopf



Polarisations-
richtung

PPS CFK - Platte



➔ Geschwindigkeit der Transversalwelle in Dickenrichtung
ist polarisationsunabhängig

$$c_{11} = c_{22}$$

➔ $c_{23} = c_{13}$ ➔ Tetragonale oder höhere Symmetrie

$$c_{55} = c_{44}$$

© Fraunhofer

Symposium Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung
19. November 2013, Berlin

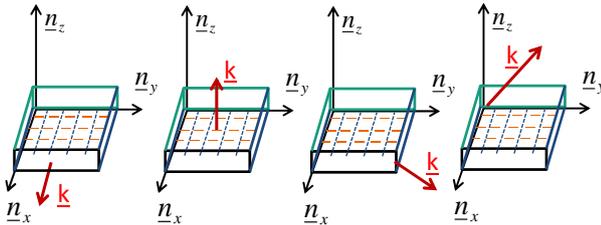


Fraunhofer
IZFP

Christoffel Gleichung für tetragonales System

$$\begin{bmatrix} c_{11}n_x^2 + c_{66}n_y^2 + c_{44}n_z^2 & (c_{12} + c_{66}) \cdot n_x n_y & (c_{13} + c_{44}) \cdot n_z n_x \\ (c_{12} + c_{66}) \cdot n_x n_y & c_{66}n_x^2 + c_{11}n_y^2 + c_{44}n_z^2 & (c_{44} + c_{13}) \cdot n_y n_z \\ (c_{13} + c_{44}) \cdot n_z n_x & (c_{44} + c_{13}) \cdot n_y n_z & c_{44}n_x^2 + c_{44}n_y^2 + c_{33}n_z^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} - \frac{\rho \omega^2}{k^2} \cdot \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = 0$$

n_x, n_y, n_z = Richtungskomponenten von \vec{k}
 u_x, u_y, u_z = Komponenten des Polarisationsvektors



$$c_{11} = (74,24 \pm 2,69) \text{ GPa}$$

$$c_{33} = (10,50 \pm 0,04) \text{ GPa}$$

$$c_{44} = (2,70 \pm 0,05) \text{ GPa}$$

$$c_{12} = ?$$

$$c_{13} = ?$$

$$c_{66} = ?$$

© Fraunhofer

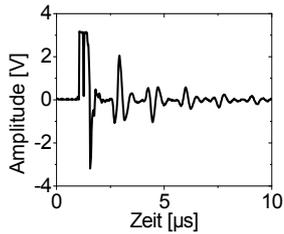
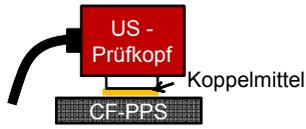
Symposium Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung
19. November 2013, Berlin



Fraunhofer
IZFP

Messung elastischer Konstanten mit Ultraschall

Kontakttechnik

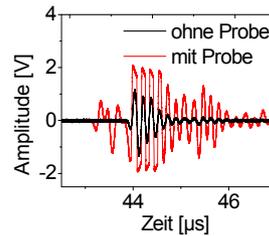


$$v = \frac{2 \cdot d}{t}$$

d = Dicke
 t = Laufzeit
 v = Geschwindigkeit

Longitudinal- sowie
 Transversalprüfkopf
 mit $f = 1 \text{ MHz}$

Tauchtechnik



$$v = \frac{d_{\text{Probe}}}{\frac{d_{\text{Probe}}}{v_{\text{Wasser}}} - \Delta t}$$

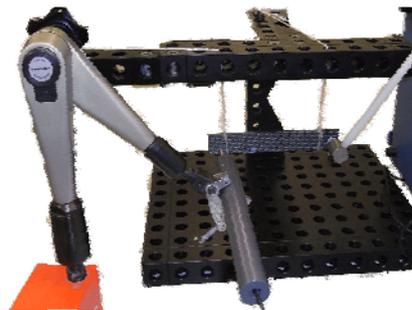
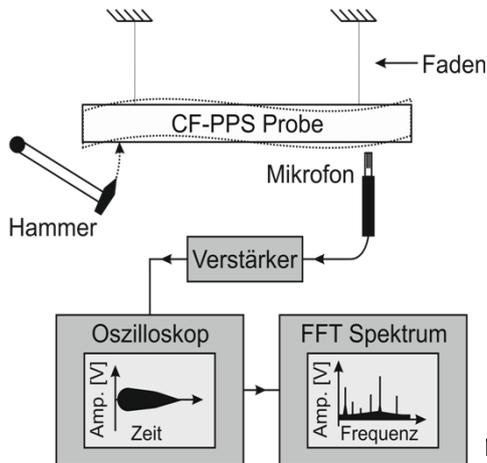
Sendepfchkopf: $f = 5 \text{ MHz}$
 (Zylinderlinse)
 Empfangsprüfkopf: $f = 5 \text{ MHz}$

© Fraunhofer

Symposium Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung
 19. November 2013, Berlin



Versuchsaufbau Resonanzspektroskopie



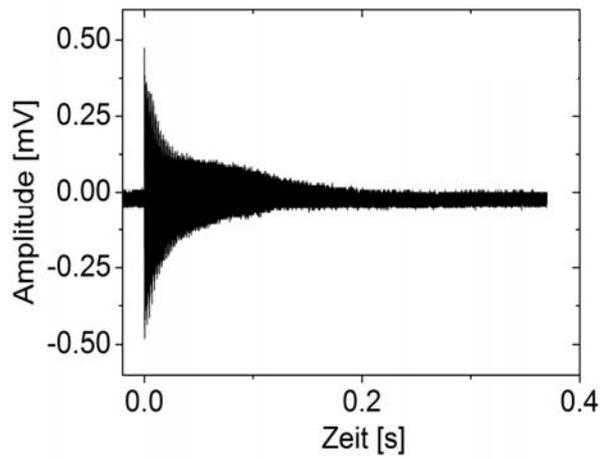
Mikrofon: Synotech; $f = 10 - 160\,000 \text{ Hz}$

© Fraunhofer

Symposium Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung
 19. November 2013, Berlin



Resonanzspektroskopie an CFK



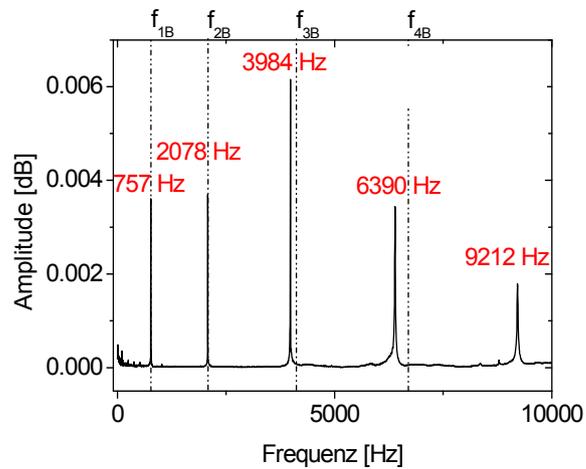
Zeitsignal, CFK-PPS Probe, 180 x 10 x 4 mm³

© Fraunhofer

Symposium Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung
19. November 2013, Berlin



Resonanzspektroskopie an CFK



Spektrum, CFK-PPS Probe, 180 x 10 x 4 mm³

© Fraunhofer

Symposium Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung
19. November 2013, Berlin

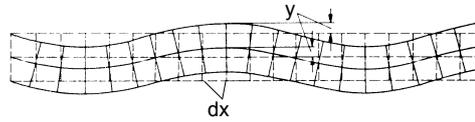


Schwingungsmoden von rechteckigen Balken

Transversale Biegemoden

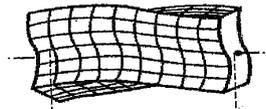
$$f_{nB} = \frac{(k_n \cdot L)^2}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{d}{L^2} \sqrt{\frac{E_{11}}{12 \cdot \rho}}$$

$$1 = \cos(k_n L) \cdot \cosh(k_n L)$$



Torsionsmoden

$$f_{nT} = \frac{n}{2 \cdot L} \cdot \frac{d}{b} \sqrt{\frac{G_{12}}{\rho}}$$



L = Länge
b = Breite
d = Dicke

n = Modenzahl
 k_n = Wellenzahl

E_{11} = E-Modul in Längsrichtung
 G_{12} = G-Modul

A. G. Piersol, T. L. Paez; Harris' Shock and Vibration Handbook; 2010.

© Fraunhofer

Symposium Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung
19. November 2013, Berlin



Fraunhofer
IZFP

Resonanzspektroskopie zur Bestimmung elastischer Konstanten

0°



90°

$$E_{11}(0^\circ) = (53,9 \pm 1,17) \text{ GPa}$$

$$E_{11}(45^\circ) = (13,3 \pm 0,4) \text{ GPa}$$

$$E_{11}(90^\circ) = (53,2 \pm 1,03) \text{ GPa}$$



$$E_{11}(0^\circ) \approx E_{11}(90^\circ) = (53,54 \pm 1,32) \text{ GPa}$$

CF-PPS - Platte

$$\frac{1}{E_{11}(\varphi)} = \frac{1}{E_{11}} \cdot \cos^4(\varphi) + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} \right) \cdot \sin^2(\varphi) \cdot \cos^2(\varphi) + \frac{1}{E_{22}} \cdot \sin^4(\varphi)$$

⇒ G_{12} und ν_{12}

Ergebnis aus den
quasistatischen
Zugversuchen (WKK)
 $\nu_{12} = 0$

$$+ E_{11}(45^\circ) = 13,3 \text{ GPa} \Rightarrow G_{12} = 3,79 \text{ GPa}$$

Altenbach; Altenbach; Einführung in die Mechanik der Laminat- und Sandwichtragwerke; 1996

© Fraunhofer

Symposium Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung
19. November 2013, Berlin



Fraunhofer
IZFP

Nachgiebigkeits- und Elastizitätstensor

Nachgiebigkeitstensor in
Matrixschreibweise

$$S_{ijkl} = C_{ijkl}^{-1}$$

Elastizitätstensor in
Matrixschreibweise

$$S_{nm} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & -\frac{\nu_{13}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & -\frac{\nu_{23}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_{33}} & -\frac{\nu_{23}}{E_{33}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{pmatrix}$$

$$C_{nm} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{pmatrix}$$

© Fraunhofer

Symposium Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung
19. November 2013, Berlin



Fraunhofer
IZFP

Ergebnis elastische Konstanten CF-PPS

Nachgiebigkeitstensor in
Matrixschreibweise [GPa⁻¹]

$$S_{ijkl} = C_{ijkl}^{-1}$$

Elastizitätstensor in
Matrixschreibweise [GPa]

$$S_{nm} = \begin{pmatrix} \frac{1}{53,54} & 0 & -\frac{0,155}{5,9} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{53,54} & -\frac{0,155}{5,9} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{0,155}{5,9} & -\frac{0,155}{5,9} & \frac{1}{5,9} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2,7} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2,7} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3,79} \end{pmatrix}$$

$$C_{nm} = \begin{pmatrix} 74,24 & 20,70 & 14,71 & 0 & 0 & 0 \\ 20,70 & 74,24 & 14,71 & 0 & 0 & 0 \\ 14,71 & 14,71 & 10,46 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2,70 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2,70 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3,79 \end{pmatrix}$$

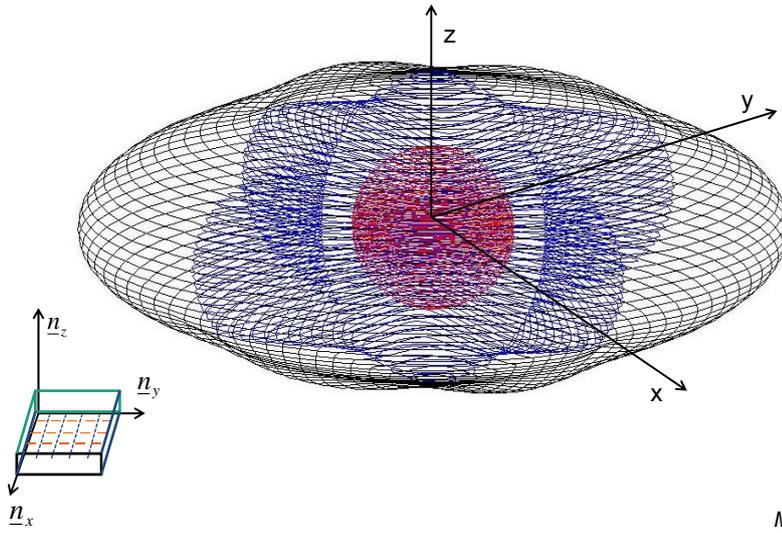
© Fraunhofer

Symposium Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung
19. November 2013, Berlin



Fraunhofer
IZFP

Slowness Flächen PPS-CFK



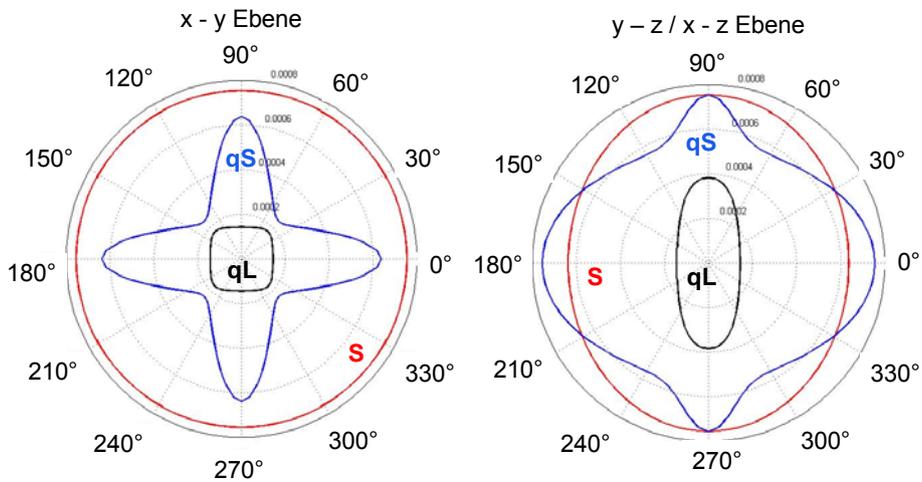
M. Sc. Kai Genz

© Fraunhofer

Symposium Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung
19. November 2013, Berlin



Slowness $1/v$ [s/m] CF-PPS, berechnet aus Messwerten



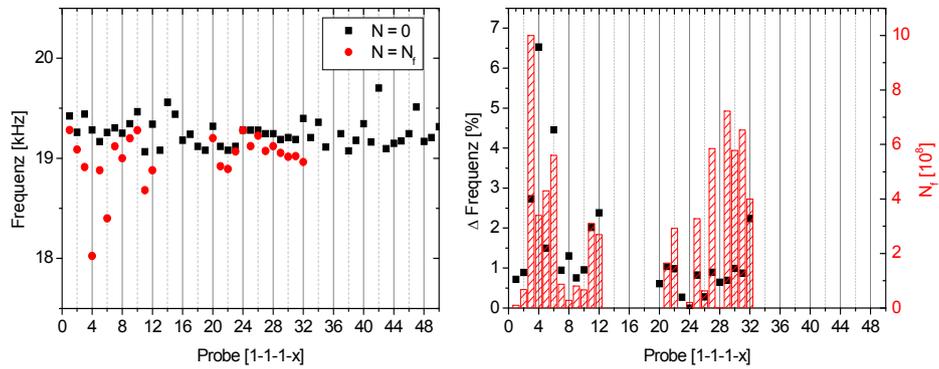
qL = quasi Longitudinalwelle; **qS** = quasi Scherwelle; **S** = Scherwelle

© Fraunhofer

Symposium Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung
19. November 2013, Berlin



Offline Charakterisierung - Resonanzspektroskopie



➔ Abnahme der Resonanzfrequenz in Folge von Ermüdungsvorgängen

© Fraunhofer

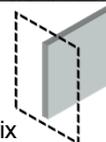
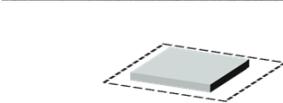
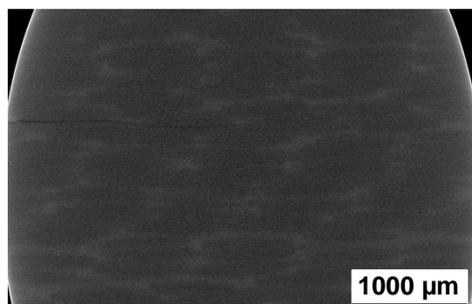
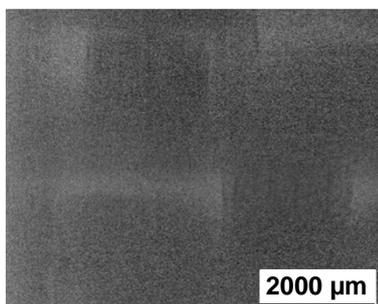
Symposium Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung
19. November 2013, Berlin



Fraunhofer
IZFP

Röntgen-Computertomografie von ermüdetem CF-PPS

Probe 1-1-1-4 ($3.3 \cdot 10^8$ Lastzyklen)



➔ Geringer Kontrast zwischen Faser und Matrix
Delamination und Risse sichtbar

Dipl. Math. Christian Schorr

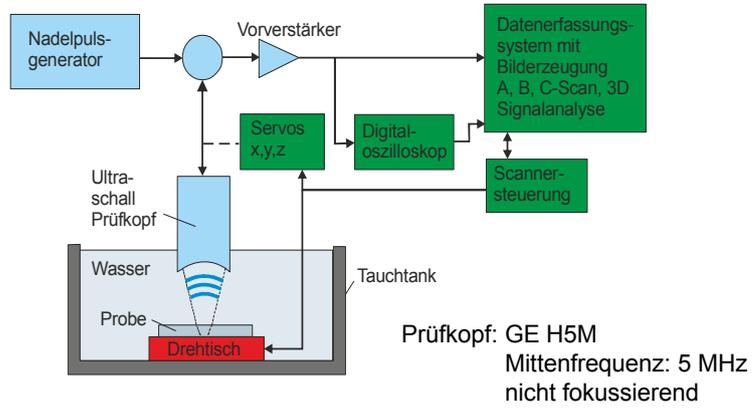
© Fraunhofer

Symposium Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung
19. November 2013, Berlin



Fraunhofer
IZFP

Ultraschallfehlerprüfung in Tauchtechnik



© Fraunhofer

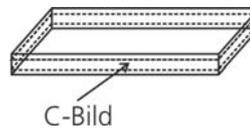
Symposium Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung
19. November 2013, Berlin



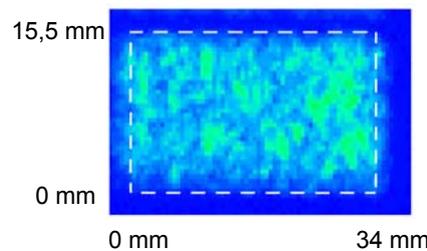
Fraunhofer
IZFP

Ultraschallfehlerprüfung in Tauchtechnik

Prüfkopf: GE H5M
Mittenfrequenz: 5 MHz
nicht fokussierend

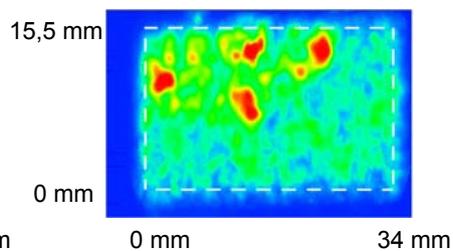


C-Bild im Ausgangszustand
 $N = 0$



C- Bild der beanspruchten Probe

$N = 3,3 \times 10^8 (= 100 \% N_f)$



➔ Faser-Matrix Struktur und Delaminationen

© Fraunhofer

Symposium Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung
19. November 2013, Berlin

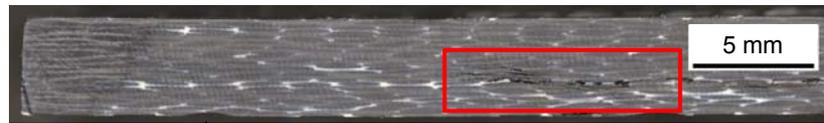
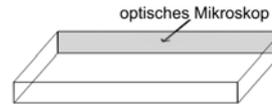


Fraunhofer
IZFP

Optische Mikroskopie einer beanspruchten Probe

$$N = 3,3 \times 10^8 (= 100 \% N_f)$$

N = Beanspruchungszyklen, N_f = Bruchlastspielzahl



Auflager

Auflager



0 mm

10 mm

© Fraunhofer

Symposium Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung
19. November 2013, Berlin



Fraunhofer
IZFP

Zusammenfassung

- Ultraschallermüdungsanlage mit einer effektiven Prüffrequenz von 2 kHz (N = 10⁹ Lastzyklen werden in 6 Tagen erreicht)
- Online Charakterisierung erfolgt mit Laservibrometer und Mikrofon
- Anwendung verschiedener Spektralanalyseverfahren
 - FFT: schnelle Methode zur Auswertung der kompletten Zeitsignale
 - Anstieg des Klirrfaktors bei Zunahme der Lastzyklen
- Direkte Bestimmung der elastischen Konstanten des 3-dimensionalen Kontinuums mit einer Kombination aus Ultraschall-Laufzeitmessung und Resonanzanalyse
- Offline Charakterisierung mit verschiedenen ZfP-Methoden zeigt Delaminationen und Risse
- Zukünftig Aussagen über Schädigung während der Online Charakterisierung

© Fraunhofer

Symposium Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung
19. November 2013, Berlin



Fraunhofer
IZFP

Danksagung

Projektpartner: Daniel Backe, Frank Balle & Dietmar Eifler
Lehrstuhl für Werkstoffkunde
Technische Universität Kaiserslautern



Förderung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im
Schwerpunktprogramm 1466: „Life ∞ – Unendliche Lebensdauer für
zyklisch beanspruchte Hochleistungswerkstoffe“

© Fraunhofer

Symposium Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung
19. November 2013, Berlin

