

Röntgen-Computer-Tomographie im Leichtbau

Hans-Jürgen ULLRICH *, Werner A. HUFENBACH **, Maik GUDE **,
Niels MODLER **, Marek DANCZAK **, Vinzenz GESKE **, Stefan RADLOFF **

* Leichtbau-Zentrum Sachsen GmbH, Dresden

** TU Dresden, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, Dresden

Kurzfassung

Im Leichtbau werden heutzutage in größerem Umfang faserverstärkte Verbundstrukturen in Verbindung mit metallischen Komponenten eingesetzt. Die Leistungsfähigkeit der Röntgendurchstrahlung zur Strukturaufklärung und Schadensdetektion derartiger Leichtbaustrukturen stößt dabei an Grenzen.

Ursachen dafür sind die geringen Dichteunterschiede in faserverstärkten Verbundwerkstoffen bei Faserdurchmessern im μm -Bereich. Eine Auflösung in dieser Größenordnung ermöglicht prinzipiell die Röntgen-Projektionsmikroskopie. Als weitere Schwierigkeit kommt dabei hinzu, dass durch die Orientierung der Fasern und die komplexen Verstärkungsstrukturen keine Detailerkennung bei dieser 2D-Durchstrahlung erreicht wird.

Im Vergleich dazu liefert die Röntgen-Computer-Tomographie (CT) besseren Kontrast und eine Detailerkennbarkeit, mit der Defekte in Lage und Form sichtbar gemacht werden können.

Im Vortrag werden die Gerätetechnik und die Vorgehensweise bei der Untersuchung der inneren Struktur dargestellt. Besonderer Schwerpunkt liegt auf dem Verfahren der „in situ CT“, welches in der Lage ist, Proben während der Belastung (Kombination aus Zug/Druck und Torsion) zu tomographieren. Schädigungsmechanismen wie zum Beispiel Riss-Schließungsprozesse können mit „in situ CT“ während der Belastung nachgewiesen werden

Am ILK ist hierzu eine eigene Apparatur konzipiert und gefertigt worden. Damit ist die Voraussetzung gegeben, die unterschiedlichen Schädigungsmechanismen (z.B. Delaminationen, Faserriss, Zwischenfaserriss) zu erkennen und Modelle für die numerischen Berechnungen zur Strukturauslegung zu generieren.

Röntgen-Computer-Tomographie im Leichtbau

H.-J. Ullrich, W. Hufenbach, M. Gude, N. Modler,
M. Danczak, V. Geske, S. Radloff

16. Seminar der DGZfP

03.04.2014 Stuttgart

Was verstehen wir unter Leichtbau?

- Gewichtsminimierung von Komponenten und Bauteilen, ohne die Funktionen der Konstruktion zu schmälern.
- Leichtbau ist kein Selbstzweck, sondern wird durch technische und ökonomische Gründe bestimmt (Kosten und Nutzen).
- Der Leichtbau hat sich als technische Wissenschaft im Bereich der Luft- und Raumfahrt entwickelt und erfährt von dort nach wie vor seine entscheidenden Anstöße.

Quelle: Vorlesung „Grundzüge des Leichtbaus“ Prof. Dr.-Ing. habil. W. Hufenbach, Dr.-Ing. F. Adam

Röntgen-Durchstrahlung-Untersuchung im Leichtbau

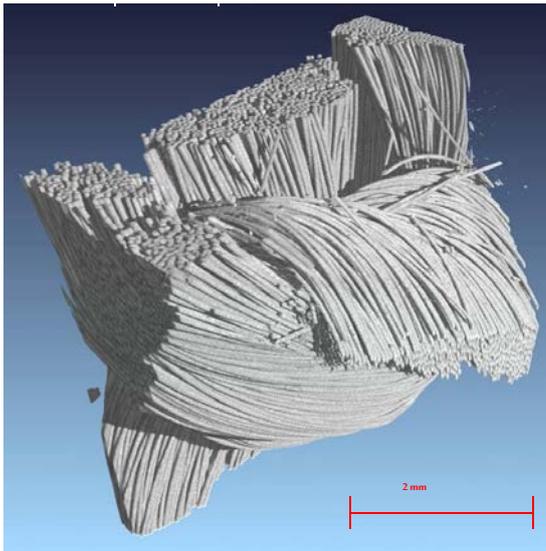
Leistungsfähigkeit der **Röntgendurchstrahlung** stößt an Grenzen:

- Geringe Dichteunterschiede in faserverstärkten Verbundwerkstoffen (CFK, GFK, ...)
- Faserdurchmesser im μm -Bereich, hohe Detailerkennbarkeit erwünscht, daher Projektionsmikroskopie erforderlich
- die Auflösung wird durch die Orientierung der Fasern bedingt
- komplexe Verstärkungsstrukturen bei textilverstärkten Bauteilen
- Komplexität der Leichtbaustrukturen ermöglicht nur bedingt die Anwendung der 2D-Durchstrahlung

→ **Röntgen-Computer-Tomographie (CT) liefert besseren Kontrast und höhere Detailerkennbarkeit.**

- die Voxel-Auflösung im CT wird von technischen Parametern des Gerätes (opt. Vergrößerung und Pixelgröße des Detektors) sowie Leistung der Röntgenröhre (Brennfleckgröße) beeinflusst

Beispiel: Textilverbund

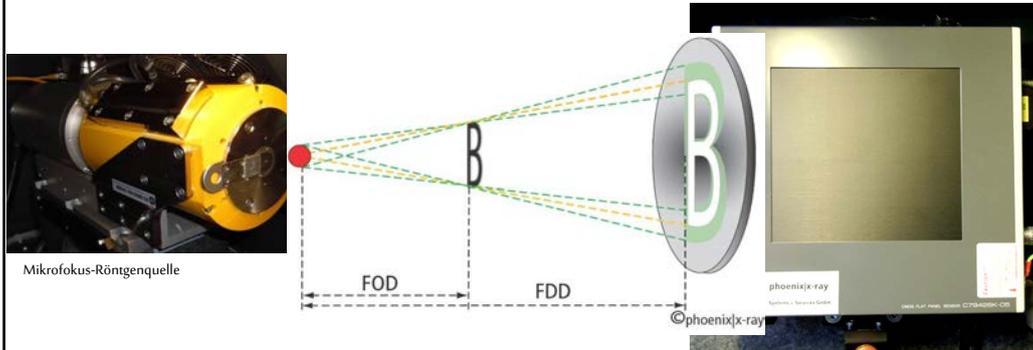


CT-Ausschnitt eines Textilverbundes

Voxel-Größe = $1 \mu\text{m}$

Faserdurchmesser = $8 \mu\text{m}$

Prinzip Röntgen-Projektionsmikroskop



Vergrößerung M = Abstand FDD durch Abstand FOD;

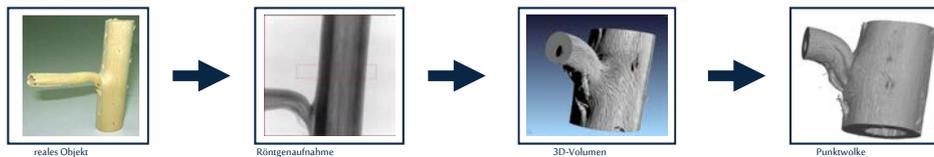
$$M = \text{FDD} / \text{FOD}$$

Virtuelle Auflösung R = Pixelgröße P durch Vergrößerung M ;

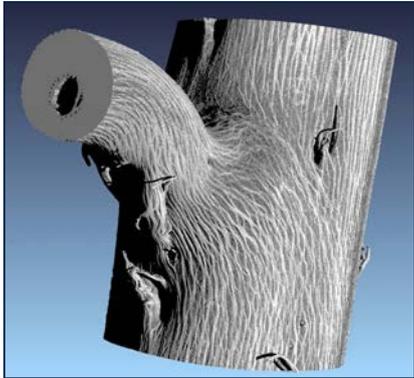
$$R = P / M$$

Röntgen-Computer-Tomographie (CT)

CT ist eine computergestützte Röntgenuntersuchung, um die innere Struktur des Objektes sichtbar zu machen. Von einem Objekt werden Röntgenaufnahmen aus verschiedenen Richtungen angefertigt und aus den Daten über Bildverarbeitung ein virtuelles Model erzeugt. Das Ergebnis wird in Form von 2D-Bildern (Schnitte) und/oder 3D-Ansichten des gesamten Volumens ausgegeben.



Visualisierung der CT-Untersuchung eines Kaktus



3D-CT-Volumen mithilfe der Visualisierungs-Software VG Studio Max

Model 10:1



CT-Systeme am ILK



nanotom 180

Röntgenröhre: 180 kV Mikrofokusröhre

Detektor: Flachdetektor, 12 bit

2304 x 2304 Pixel

Pixel: 50 x 50 µm

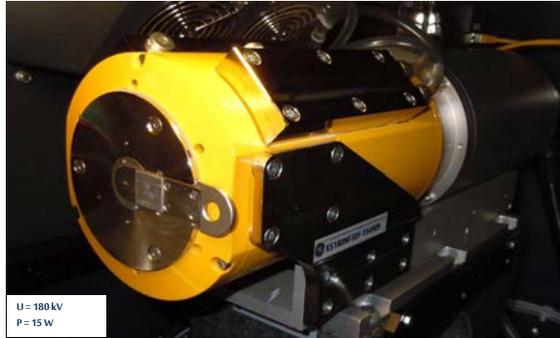
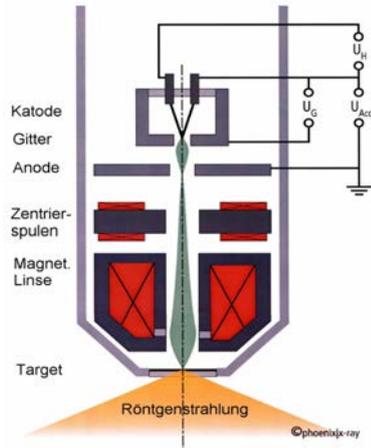
Probe:

Max. Durchmesser: 120 mm

Max. Größe: 150 mm

Max. Gewicht: 2 kg

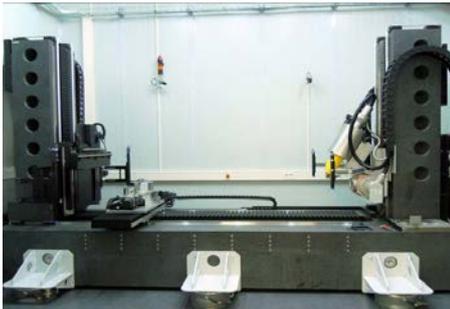
Mikrofokus-Röntgenröhre



U = 180 kV
P = 15 W

Transmissions- oder Stirnfensterröhre
im nanotom (GE phoenix x-ray) ermöglicht
hohe Detailerkennbarkeit

CT-Systeme am ILK



v|tome|x|450

Röntgenröhren:

- 300 kV Mikrofokusröhre
- 450 kV Makrofokusröhre

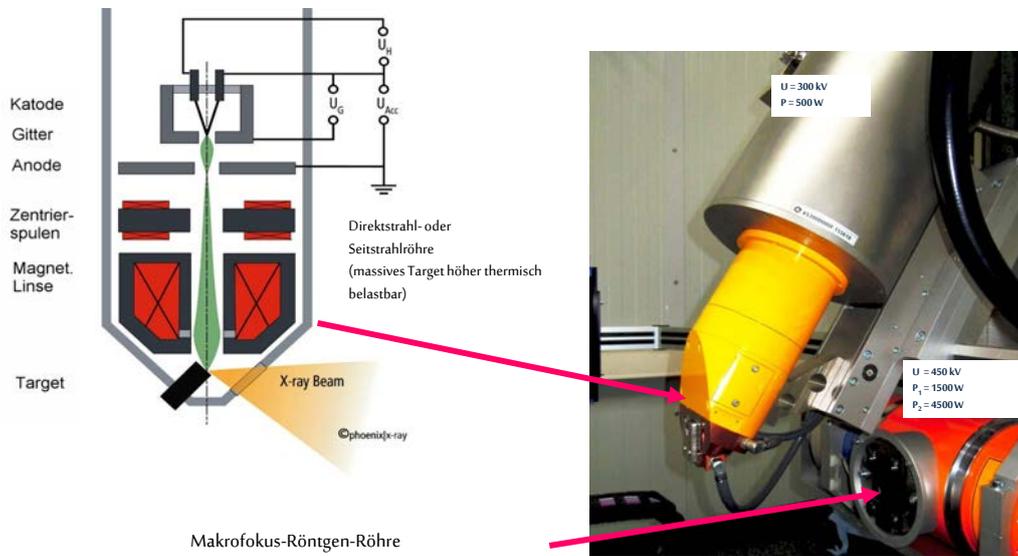
Detektoren:

- **Flachdetektor** 14 bit
2024 x 2024 Pixel,
Pixel: 200 μm x 200 μm
- **Zeilendetektor**
Breite: 800 mm
Pixel: 400 μm x 400 μm
- **Multizeilendetektor**

Probe:

Max. Durchmesser:	920 mm
Max. Größe:	2500 mm
Max. Gewicht:	200 kg

Seitfenster - Röntgen-Mikrofokus- und Makrofokus-Röhre



Notwendigkeit für „in situ CT“

Ziel: Untersuchung der Schädigungsmechanismen

CT-Untersuchung vor und nach dem Deformationstest nicht aussagekräftig.

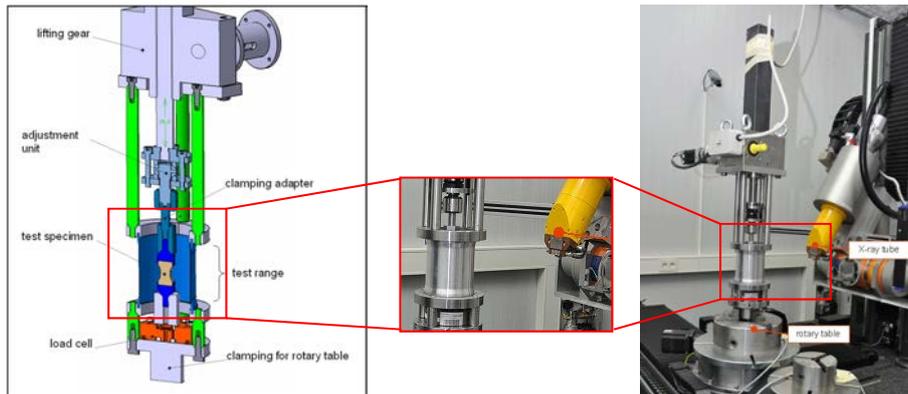
Bei unterschiedlichen Laststufen werden die Verformung aufrechterhalten und die CT-Untersuchung durchgeführt.

Für eine mathematische Simulation ist es wichtig, die Rissentstehung und Rissausbreitung im Detail zu kennen.

Diese Forderungen kann nur eine „in situ CT“ vollständig erfüllen.

„In situ CT“ am ILK Variante 1

- Vorrichtung integrierbar in das CT-System v|tome|x I 450
- Zug- und Drucklasten bis zu 50 kN
- „Messfenster“ – Al-Zylinder mit 1,5 mm Wandstärke, $D_a = 100 \text{ mm}$, $H = 80 \text{ mm}$
- Max. Auflösung: $10 \mu\text{m}$
- Min. Messzeit: 20 Min. für eine CT-Untersuchung



„In situ CT“ am ILK Variante 2

In situ CT FCTS 160 – IS



In situ CT FCTS 160 – IS

Röntgenröhre:
Mikrofokusröhre - 160 kV / 1mA
Detailerkennbarkeit: $< 1,5 \mu\text{m}$

Flachdetektor:
Auflösung: 7,3 Mio Pixel (2300 x 3200)
Pixelgröße: $127 \mu\text{m}$
Graustufen: 14 bit
Röntgenfläche: 400 x 300 mm

Zwick ZZ50 (4 Säulen):
Zug / Druck / Torsion



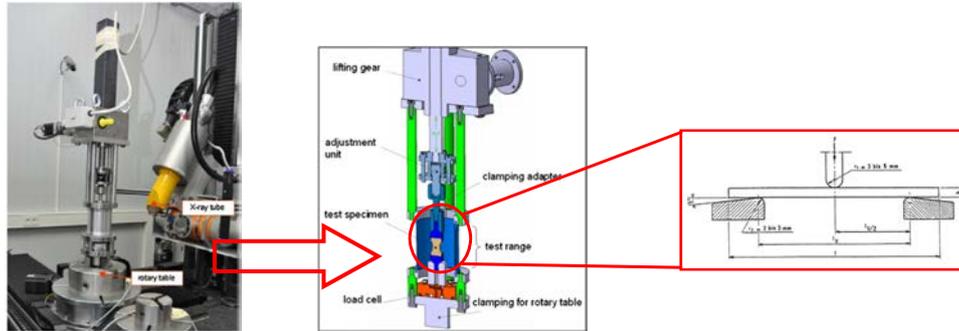
„In situ CT Vorrichtung“ für mehrachsige Belastungen
(Zug/Druck und Torsion)



Mögliche Anwendungen

- Qualitätssicherung
 - Porengehalt und Porengrößenverteilung
 - Faservolumengehalt
 - Lagenaufbau und Faserorientierung
- Metrologie
 - Abmessungen inkl. Soll/Ist-Vergleich mit CAD-Modell
 - Wandstärke...
- CAE-Modellbildung/Strukturaufklärung
- Schädigungsanalyse und Phänomenologie mittels „in situ CT“
- Reverse Engineering

3-Punkt-Biege-Versuch – „In situ CT“



3-Punkt Biegeversuch zur Bestimmung der interlaminaren Scherspannung und Untersuchung von Brüchen:

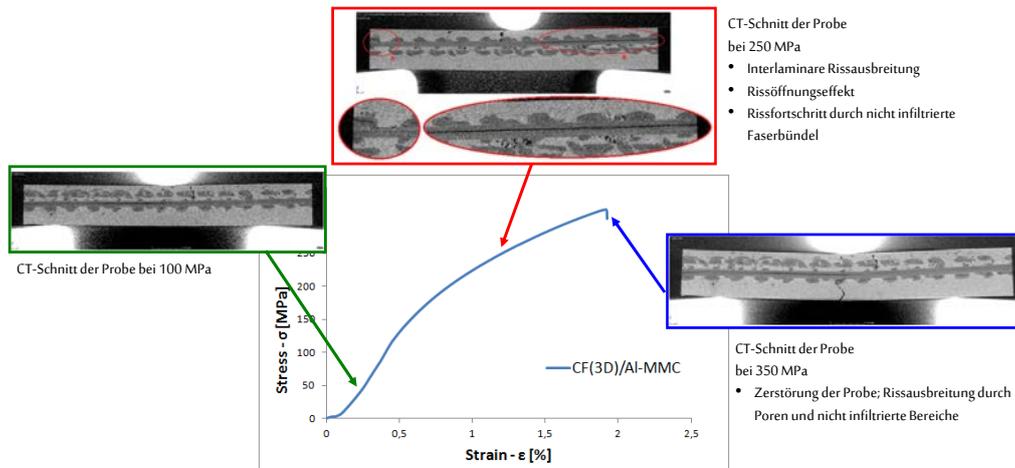
- Probenabmessung 33.5 x 16.5 x 5 [mm³]
- Test nach EN2377-Standard
- Ein CT-Scan wurde nach jeder Kraftänderung durchgeführt

Quelle: 3D textile-reinforced aluminium matrix composites for complex loading situations in lightweight automobile and machine parts
M. Gude, A.Czulak, P. Malczyk

3-Punkt-Biege-Versuch – CT Beobachtung

In situ Spannungs-Dehnungs-Test bei gleichzeitiger 360° CT

- Existenz von mikrostrukturellen Fehlern (Poren, Risse)
- Mikrorissbildung bei bestimmter Last
- Beobachtung der Rissausbreitung



CT-Schnitt der Probe

bei 250 MPa

- Interlaminare Rissausbreitung
- Rissöffnungseffekt
- Rissfortschritt durch nicht infiltrierte Faserbündel

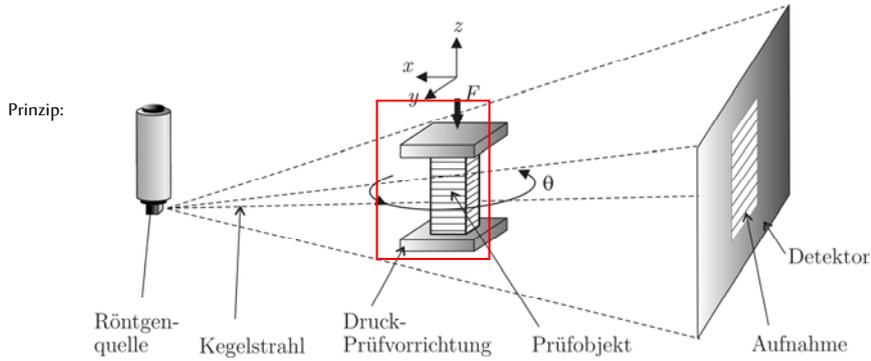
CT-Schnitt der Probe bei 100 MPa

CT-Schnitt der Probe
bei 350 MPa

- Zerstörung der Probe; Rissausbreitung durch Poren und nicht infiltrierte Bereiche

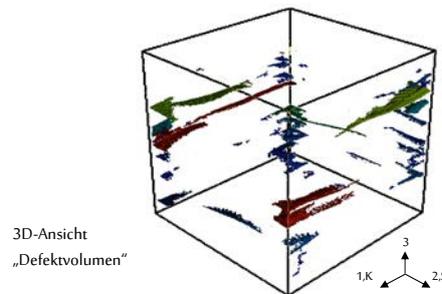
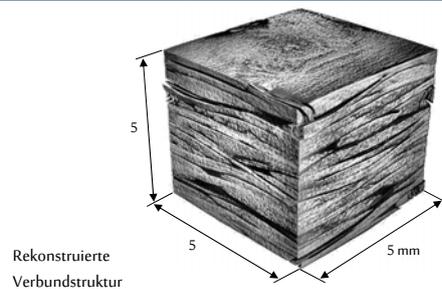
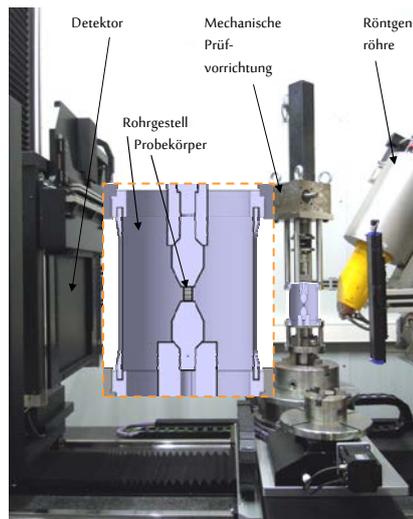
„In situ CT“ Druckversuch

- Ergänzende Versuchsmethode zum klassischen mechanischen uniaxialen Druckversuch
- Analyse von Schädigungsinitiierung unter bestimmten Spannungszuständen
- Untersuchung zum Einfluss von textilen Parametern auf das Versagensverhalten

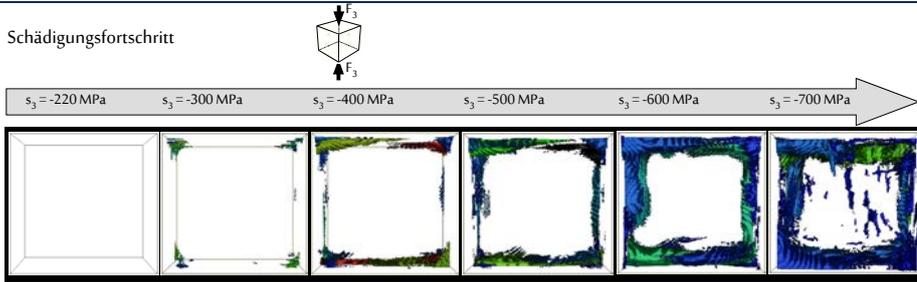


Quelle: A test device for damage characterisation of composites based on in situ computed tomography W. Hufenbach, M. Andrich, A. Langkamp „Composites Science and Technology“ Volume 72, Issue 12, 2012, Pages 1361–1367

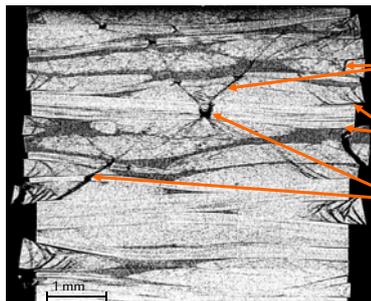
„In situ CT“ Druckversuch



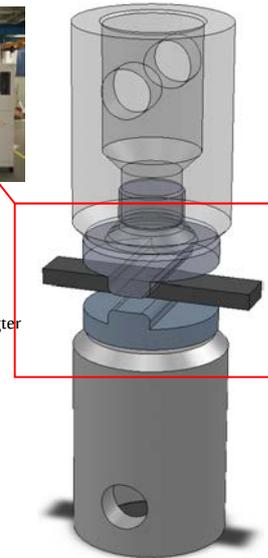
„In situ CT“ Druckversuch



Endversagen:
Faserbruch
 $s_3 = -700 \text{ MPa}$



CT-Beispiele: C/C-Probe unter Druckbelastung



- Druckbeanspruchung senkrecht auf ein Laminat aus Hochleistungsfasern (Textil) und keramischer Matrix
- Analyse des Schädigungsverhaltens dieser faserverstärkten Keramiken anhand ungeschädigter und geschädigter Probekörper
- Beschreibung mikromechanischer Vorgänge (Risswachstum, Delamination, u.a.)

Quelle: Untersuchung der Auswirkung von Druckbeanspruchung in Dickenrichtung auf die mechanischen Eigenschaften von Textilverbund-Keramik
W. Hufenbach, T. Behnisch, A. Langkamp

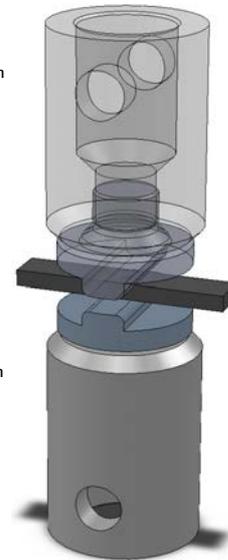
CT-Beispiele: C/C-Probe unter Druckbelastung

Problem:

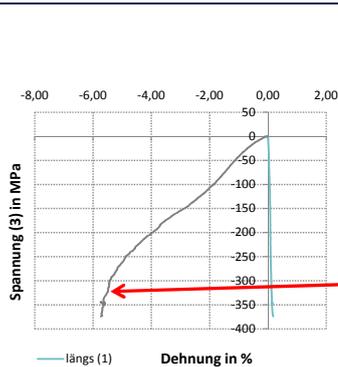
- Erkennbare Unterschiede zwischen geschädigten und ungeschädigten Probekörpern zeigen sich nach Entlastung nur bei sehr hohen Spannungen
- Werkstoffschädigung beginnt allerdings schon bei geringeren Lasten
- Analyse des Materialverhaltens während der Beanspruchung (in situ) ist erforderlich

Ziel:

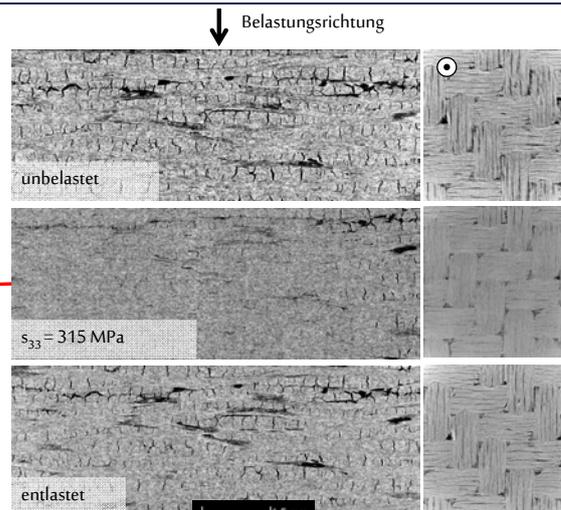
- Untersuchung des Materialverhaltens unter sukzessiver Komprimierung (schrittweise Lasterhöhung)
- Gegenüberstellung der Spannungs-Dehnungs-Kurve mit den CT-Bildern
- Verständnis des Zusammenhanges von mechanischer Belastung und den daraus resultierenden Schädigungen



CT-Beispiele: C/C-Probe unter Druckbelastung



Konventionelle CT kann keine Aussage über mögliche Materialveränderungen nach der Belastung treffen.

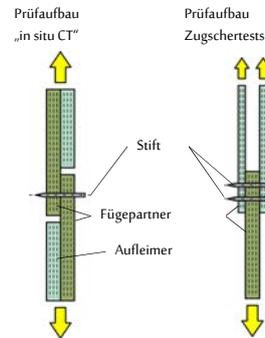


Riss-Schließungsprozesse können nur mit „in situ CT“ während der Belastung nachgewiesen werden und damit werden die numerischen Berechnungen ermöglicht

Thermoaktiviertes Verstiften

• Analyse des Verformungs- und Versagensverhaltens

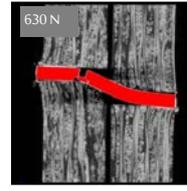
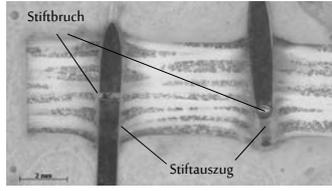
- Prüfung von Stiftverbindungen mittels „in situ CT“
- Scan von 6 Laststufen
- Vergleich mit Zug-Scher-Versuchen



Bruchbild



Schliffbild einer Stiftreihe nach Bruch



SFB 639 Teilprojekt B3: Von Filament zum Bauteil

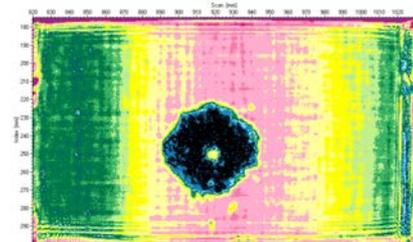
Impact-Versuch: Ultraschall-Untersuchung



Versuchsanordnung mit gebogener Composit-Platte



TWINTEX® Platte mit Grauwert-Muster für DIC (Dicke: 8 mm)



Ultraschall
C-Bild

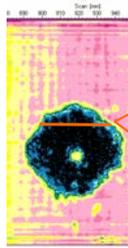
- Identifizierung des beschädigten Bereiches
- Keine Aussage der Verteilung der Delamination über die Probendicke

=> Ausweg: Röntgen-Mikro-CT

Quelle: Experimental and numerical evaluation of crash and impact loaded textile reinforced thermoplastic components
W. Hufenbach, A. Langkamp, A. Hornig, H. Böhm, M. Berthel
15th European Conference on Composite Materials (ECCM-15), Venice (Italy) 2012

Impact-Versuch: Mikro-CT-Untersuchung

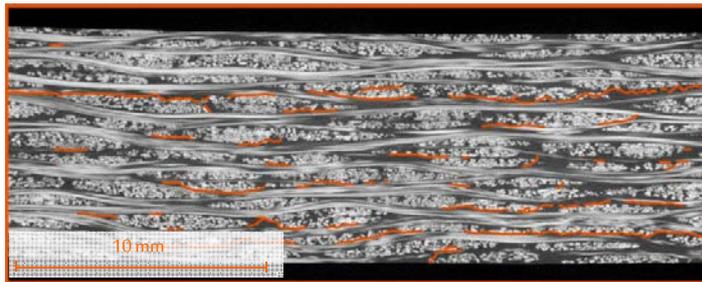
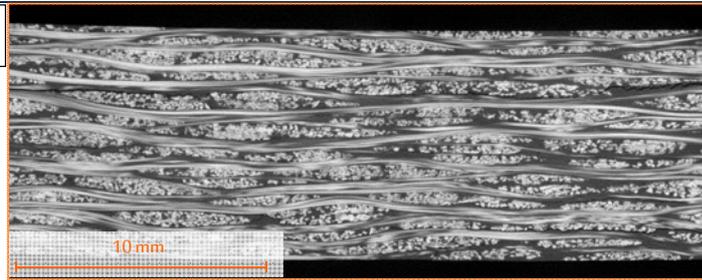
max. Breite der detektierten Risse beträgt 70 μm



CT-Schnitt

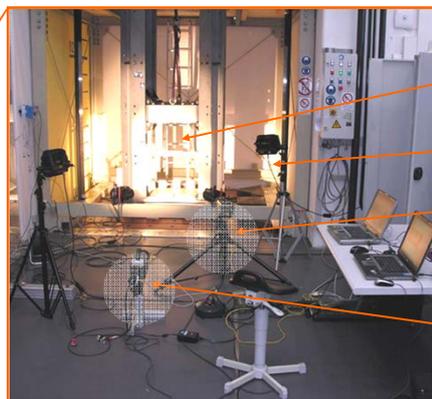
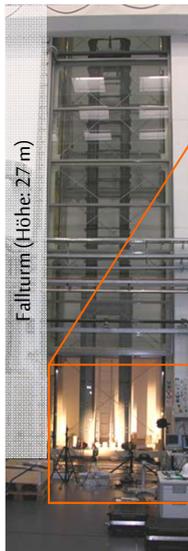
Ultraschall C-Bild

U = 120 kV
I = 300 μA
Auflösung \approx 16 μm



Räumliche Verteilung der einzelnen Risse

Crash-Test im Fall-Turm des ILK der TU Dresden



- Gleitschlitten
- Beleuchtung
- Kamera 1 (seitlich)
- Kamera 2 (frontal)

Quelle: Serienfähige Fertigungsverfahren für gekrümmte Mehrkammer-Hohlprofile in Faserverbundbauweise
Leichtbausymposium Dresden 2011
M. Krahl, T. Weber, W. Hufenbach, M. Zichner, K.-H. Modler, U. Hanke, R. Schweizer

Crash-Test



 Institut für
Leichtbau und
Kunststofftechnik

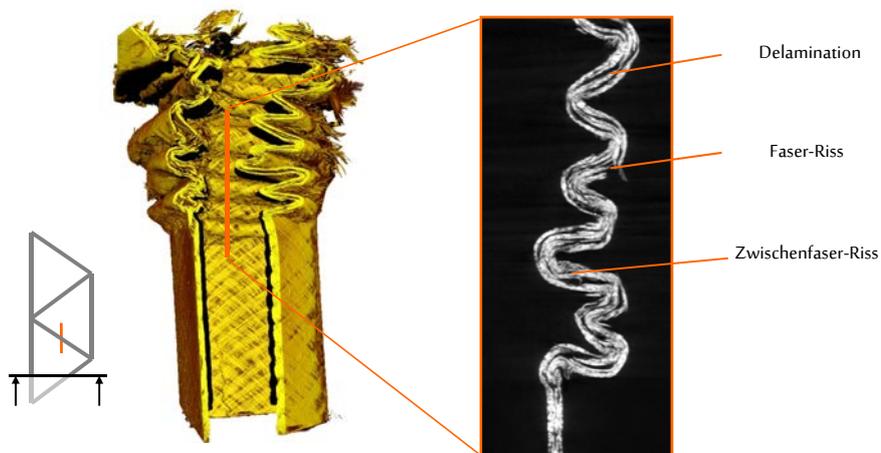
29

© Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik,
TU Dresden, <http://tu-dresden.de/mw/ilk>



Crash-Test

- Analyse des Profils mittels CT
- Absorption der mechanischen Energie durch verschiedene Mechanismen



 Institut für
Leichtbau und
Kunststofftechnik

30

© Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik,
TU Dresden, <http://tu-dresden.de/mw/ilk>



Zusammenfassung

- Röntgen-CT ist ein sehr aussagekräftiges Verfahren zur Untersuchung und wichtiges Arbeitsmittel bei der Entwicklung von Leichtbaustrukturen
- Hochauflösende „in situ CT“ ermöglicht präzise Untersuchung von Faserverbundwerkstoffen unter mehrachsiger Belastung (Zug/Druck, Biegung und Torsion)
- „In situ CT“ erhöht den Informationsgehalt experimenteller Untersuchungen mit zusätzlichen Ergebnissen
=> Einblicke in das Schädigungsverhalten von Verbundwerkstoffen
- Optimierung von mathematischen Modellen für die Schadensvorhersage

Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit