

# Einsatz der Röntgen-Computertomographie zur Untersuchung von Faserverbund- strukturen in der Luft- und Raumfahrt

Thomas ULLMANN \*, Raouf JEMMALI \*

\* Institut für Bauweisen- und Strukturtechnologie, Deutsches Zentrum für Luft- und  
Raumfahrt e.V. (DLR), Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart

## Kurzfassung

Bedingt durch steigende Anforderungen bei Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen spielen Leichtbaustrukturen aus Faserverbundwerkstoffen für Designkonzepte moderner Flugzeuge eine immer wichtigere Rolle. Mit Einführung des Dreamliners bei Boeing und des A350 XWB bei Airbus sind die beiden weltführenden Hersteller ziviler Großraumflugzeuge dazu übergegangen, neuartige Rumpf- und Flügelstrukturen zu etablieren, die überwiegend auf kohlenstofffaserverstärkten Verbundwerkstoffen basieren und maximale Stabilität mit erheblichen Gewichtseinsparungen verbinden sollen. Auch in der Raumfahrttechnik, bei der Leichtbaustrukturen enorm hohen thermisch-mechanischen Belastungen ausgesetzt sein können, werden zunehmend kohlenstofffaserverstärkte Verbundkeramiken eingesetzt, die bei Herstellung und Designkonzept ganz andere Anforderungen stellen, als dies die Konstrukteure von vergleichbaren Strukturkomponenten aus Leichtmetalllegierungen bislang gewohnt sind. Für die Herstellung aber auch für das Fügen und mechanische Verbinden solcher faserverstärkten Verbundstrukturen müssen daher neue Qualitätsstandards definiert und deren Einhaltung durch prozessintegrierte Prüfsysteme gewährleistet werden.

Neben zahlreichen etablierten Prüfmethoden, wie Ultraschall, Thermographie oder radiographischen Inspektionsverfahren kommt der Röntgen-Computertomographie (CT) eine Schlüsselrolle wegen ihrer 3-dimensionalen Bildgebung bei zugleich sehr hoher Detailauflösung zu. Dabei ist die CT weniger für die prozessintegrierte Prüfung während eines Herstellungsverfahrens als vielmehr als Referenzmethode zur Werkstoff- und Bauteilentwicklung geeignet. Mit ihr gelingt es wie mit keiner anderen zerstörungsfreien Prüfmethode, die Initiierung von Materialfehlern und deren Entwicklung bis hin zum totalen Bauteilversagen zu analysieren. Mit ihrer hohen Ortsauflösung ermöglicht die CT mikrostrukturelle Muster in Verbundwerkstoffen zu klassifizieren und damit zwischen versagenskritischen und nichtkritischen Fehlern überhaupt erst unterscheiden zu können. Viel wichtiger aber ist die systematische Analyse der Wechselwirkungen von mikrostrukturellen Mustern und Werkstoffeigenschaften mit dem Ziel das Verhalten des Werkstoffs und dessen Strukturen unter realen Einsatzbedingungen vorhersagen zu können. Auch hier liefern die computertomographischen Untersuchungen Erkenntnisse, die bei keiner anderen zerstörungsfreien Methode mit dieser Genauigkeit erzielt werden können.



Der Vortrag zeigt die Stärken und Schwächen der CT-Analyse an Faserverbundwerkstoffen im Vergleich mit anderen zerstörungsfreien Prüfmethode n auf. Durch Beispiele mit konkreten Fragestellungen aus Anwendungsbereichen und Entwicklungsprojekten in der Luft- und Raumfahrttechnik werden die Möglichkeiten und Potenziale der CT in Ergänzung zu anderen zerstörungsfreien Verfahren dargestellt.

## Einsatz der Röntgen-Computertomographie zur Untersuchung von Faserverbundstrukturen in der Luft- und Raumfahrt

Thomas Ullmann, Raouf Jemali

Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie, DLR Stuttgart

Aktuelle Fragen der Durchstrahlungsprüfung und des Strahlenschutzes,  
Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V.  
Stuttgart, 3. April 2014



### Übersicht

- Computertomographie – Einordnung in die ZfP
- CT-Anlagen des DLR-Forschungszentrums in Stuttgart
- Untersuchung von CMC-Bauteilen
- Untersuchung von CFK-Bauteilen
- Werkstoffcharakterisierung
- Zusammenfassung



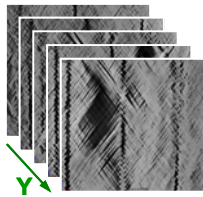
## Computertomographie

Einordnung in die Zerstörungsfreie Prüfung

### Bildgebende Verfahren

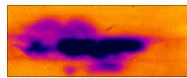
#### Röntgen

ca.  $10^{16}$ - $10^{20}$  Hz  
Röntgenprüfung  
Computertomographie



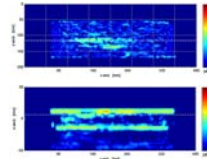
#### Infrarot

ca.  $10^{13}$ - $10^{14}$  Hz  
Thermographie



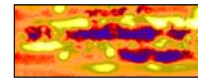
#### THz/MW

ca.  $10^9$ - $10^{13}$  Hz  
Terahertzprüfung  
Mikrowellentechnik



#### Ultraschall

ca.  $10^4$ - $10^9$  Hz  
US-Prüfung  
(luft-/wassergek.)

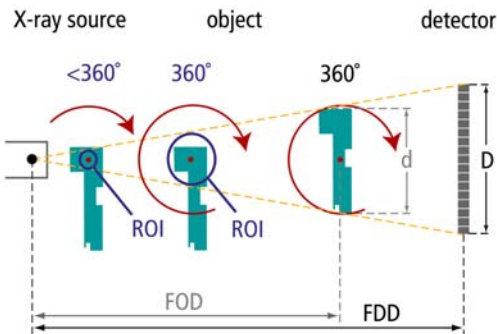


Bildquelle: T. Ullmann et al., Quality Assurance for the Manufacturing of Oxide Fiber Reinforced Ceramic Composites for Aerospace Applications, 4<sup>th</sup> Int. Symp. of NDT in Aerospace, Augsburg (2012)



## Computertomographie

Einordnung in die Zerstörungsfreie Prüfung



Auflösung  $\Rightarrow$  Voxelgröße

$$V = \frac{\text{Pixelgröße}}{\text{Vergrößerung}} = \frac{P}{M}$$

wobei:  $M = \frac{FDD}{FOD}$

Bildquelle: GE Sensing and Inspection Technologies



## Computertomographie

Einordnung in die Zerstörungsfreie Prüfung

	Computer- tomographie	Röntgen- transmission	Ultraschall	Lock-in Thermographie
<b>berührungslos</b>	+++	+++	+ (nur Luft-US)	+++
<b>bildgebend – 3D-digital</b>	+++	++ (2-dim. Projektion der Strukturen & Fehlstellen)	0 (2-dim. Projektion & rel. geringe aufgelöste Fehlerabbildung)	0 (2-dim. Projektion & rel. gering aufgelöste Fehlerabbildung)
<b>ortsauflösend &amp; defektselektiv</b>	+++	++ (nur bedingt)	0 (nur bedingt)	0 (nur selektive Tiefeninformation)
<b>schnell &amp; flächendeckend</b>	0 (nur bedingt)	0 (nur bedingt)	+ (z.T. auch längere Messzeiten)	+++
<b>mobil einsetzbar</b>	- (fest installierte Anlage)	- (fest installierte Anlage)	+++	+++



## CT-Anlagen

v|tome|x 450L

Standort:  
Institut für Bauweisen und  
Strukturtechnologie, DLR  
Stuttgart

Röntgenröhren:  
1) 240 kV Mikrofokus  
2) 450 kV Isovolt-Minifokus



Flächendetektor:	2048 x 2048 Pixel à 200 µm (16 Bit)
Max. erfassbarer Bauteilbereich:	B = 700 mm (horizontal); H = 1000 mm (vertikal)
Max. Bauteilgröße:	ca. 1000 x 1800 mm (B x H)
Max. Bauteilgewicht:	100 kg

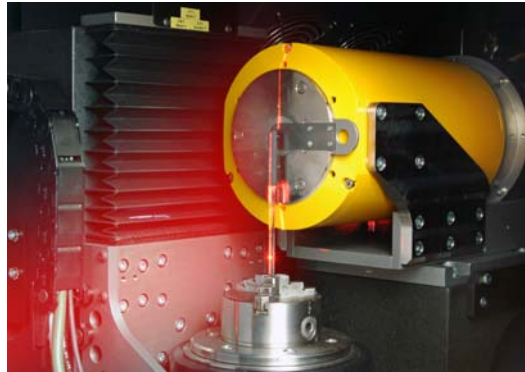


## CT-Anlagen

nanotom 180NF

Standort:  
Institut für Bauweisen und  
Strukturtechnologie, DLR  
Stuttgart

Röntgenröhre:  
180 kV Nanofokus

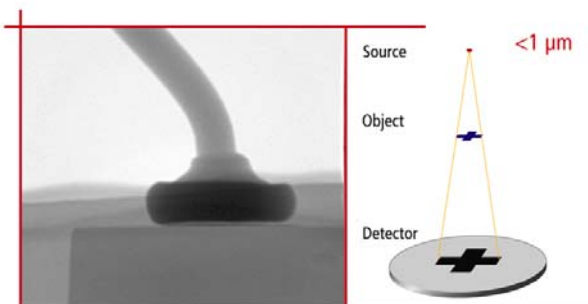


Flächendetektor:	2300 x 2300 Pixel à 50 µm (12 Bit)
Min. Voxelgröße:	< 1 µm
Min. Brennfleckdurchmesser:	ca. 900 nm
Max. Probendurchmesser:	ca. 100 mm



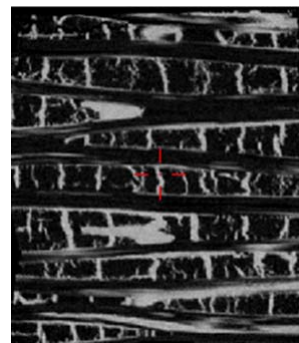
## CT-Anlagen

Einfluss des Brennfleckdurchmessers



nanofocus® resolution

Nanotom: hoch aufgelöste Computertomographie



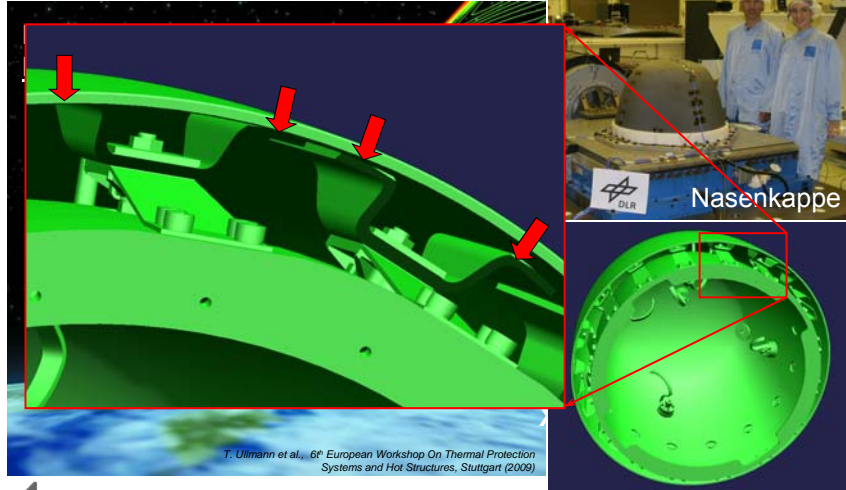
Mikrostruktur bei <math>< 1 \mu\text{m}</math>  
Brennfleckgröße (C/C-SiC)

Bildquelle: GE Sensing and Inspection Technologies



## Untersuchung von CMC-Bauteilen

C/C-SiC Nasenkappe: Krafteinleitungen



T. Uilmann et al., 6<sup>th</sup> European Workshop On Thermal Protection Systems and Hot Structures, Stuttgart (2009)



## Untersuchung von CMC-Bauteilen

C/C-SiC Nasenkappe: Krafteinleitungen



2D-Röntgenprojektion

Bild: R. Jemali



3D-Darstellung

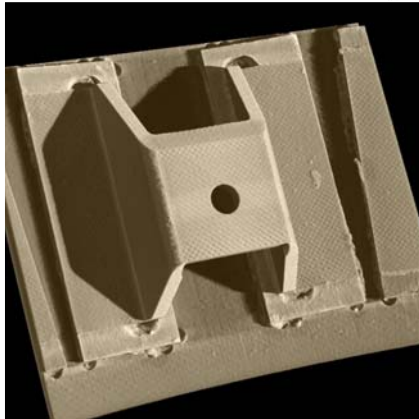


Bild: R. Jemali

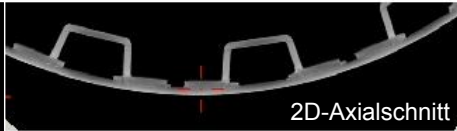


## Untersuchung von CMC-Bauteilen

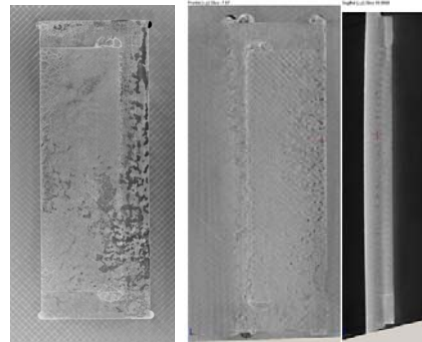
C/C-SiC Nasenkappe: Krafteinleitungen



3D-Darstellung (CT-Bild)



2D-Axialschnitt

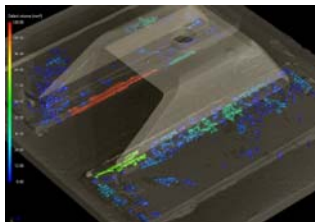


Bilder: R. Jemali

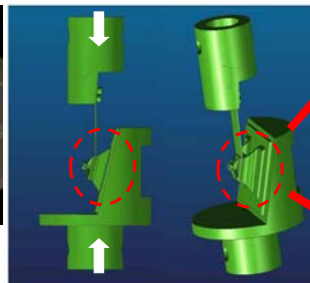
## Untersuchung von CMC-Bauteilen

C/C-SiC Nasenkappe: Krafteinleitungen

Ermittlung des Einflusses der Porositätsdichte und -verteilung auf die mechanische Festigkeit der Fügefläche



Porositätsanalyse im CT



Qualifikationstest (Schub-/Scherbelastung)



Versagen der Fügefläche



Versagen im CMC-Gefüge

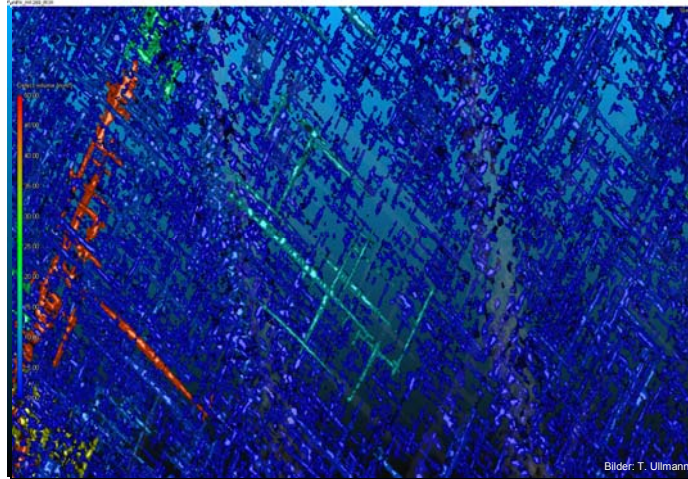
T. Ullmann et al.,  
Computed Tomography for Non-destructive Inspection of Hot Structures and TPS Components, 6<sup>th</sup> European Workshop On Thermal Protection Systems and Hot Structures, Stuttgart (2009)





## Untersuchung von CMC-Bauteilen

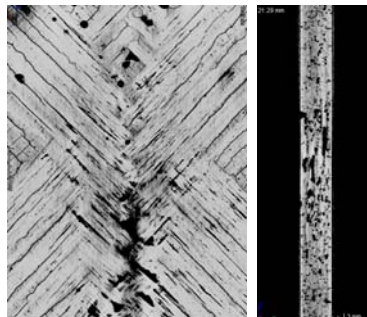
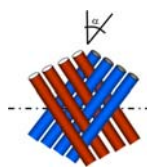
WHIPOX-Porenstruktur



## Untersuchung von CMC-Bauteilen

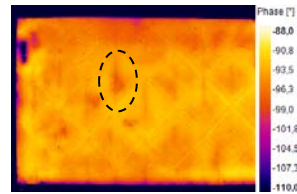
WHIPOX-Porenstruktur

### Computertomographie

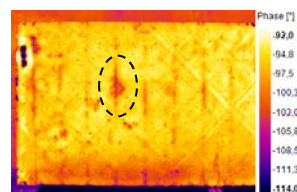


**W1233** – ROI-scan eines Überkreuzungspunktes (Voxelgröße: 28  $\mu\text{m}$ )

### Lock-in Thermographie



**W1233 (0,01 Hz)**



**W1233 (0,06 Hz)**

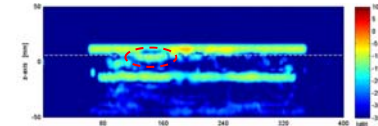
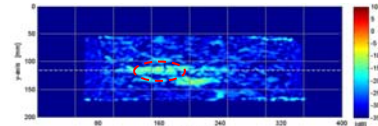
T. Ullmann et al., Quality Assurance for the Manufacturing of Oxide Fiber Reinforced Ceramic Composites for Aerospace Applications, 4<sup>th</sup> Int. Symp. of NDT in Aerospace, Augsburg (2012)



## Untersuchung von CMC-Bauteilen

WHIPOX-Porenstruktur und Delaminationen

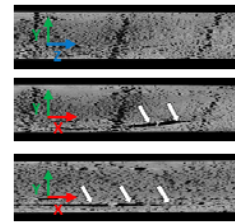
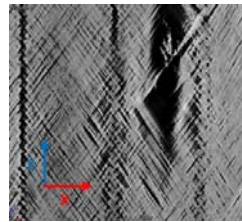
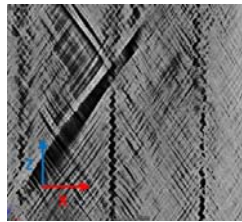
THz



W1289 – XY-Schnitt bei 0,1 THz (Tiefe: 2-3 mm)

W1289 – B-Scan bei 0,1 THz (Querschnitt)

CT



XZ-Ebene: Filamentverschiebung

XZ-Ebene: Delamination

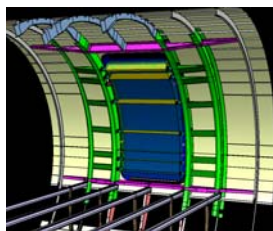
XY-Ebene: Delamination  
(Tiefe: 2-3 mm)

*T. Ullmann et al., Quality Assurance for the Manufacturing of Oxide Fiber Reinforced Ceramic Composites for Aerospace Applications, 4<sup>th</sup> Int. Symp. of NDT in Aerospace, Augsburg (2012)*



## Untersuchung von CFK-Bauteilen

Türrahmenstruktur



Türumgebungsstruktur  
aus CFK (grün)



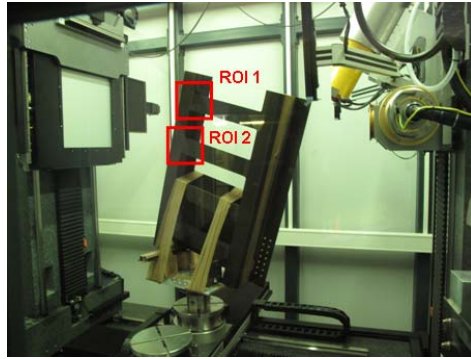
➤ Demonstrator für eine Türrahmenstruktur  
(ca. 940 x 640 x 140 mm)

➤ Untersuchung mit CT und OLT

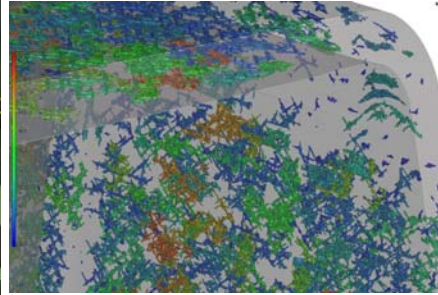


## Untersuchung von CFK-Bauteilen

Türrahmenstruktur: Porenanalyse



ROI Messungen im CT



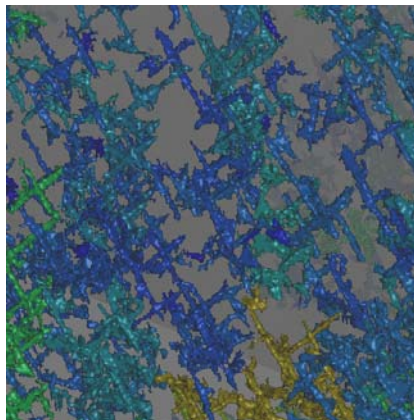
ROI-Segment (3D) mit farblich markierten Porenvolumina

➤ Suche nach Porosität und Delaminationen

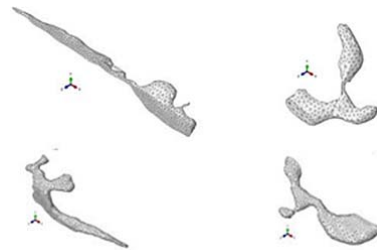


## Untersuchung von CFK-Bauteilen

Türrahmenstruktur: Porenanalyse



Reales Porennetzwerk in CFK (CT)



Modellierte Porenformen in CFK

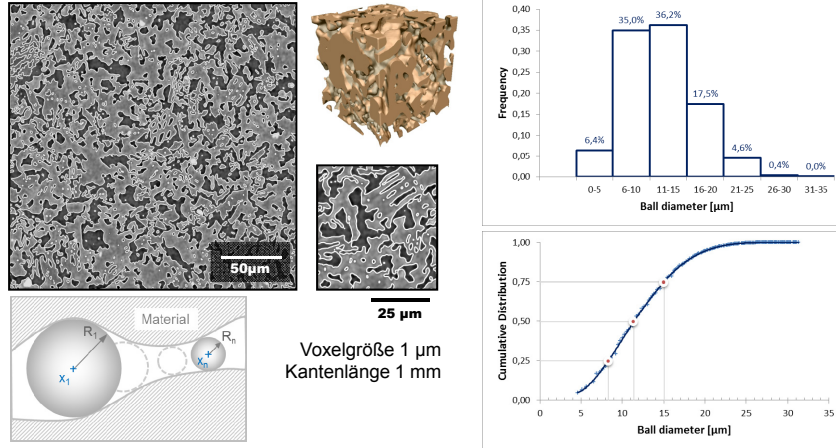
*Kreikmeier et al.: Experimentelle und numerische Untersuchungen von CFK mit herstellungsbedingten Fehlstellen, 10. Magdeburger Maschinenbautage (2011)*

*Messung u. Porenauswertung: T. Ullmann (2012)*



## Werkstoffcharakterisierung

### Granulometrie an Probe aus biogener Keramik

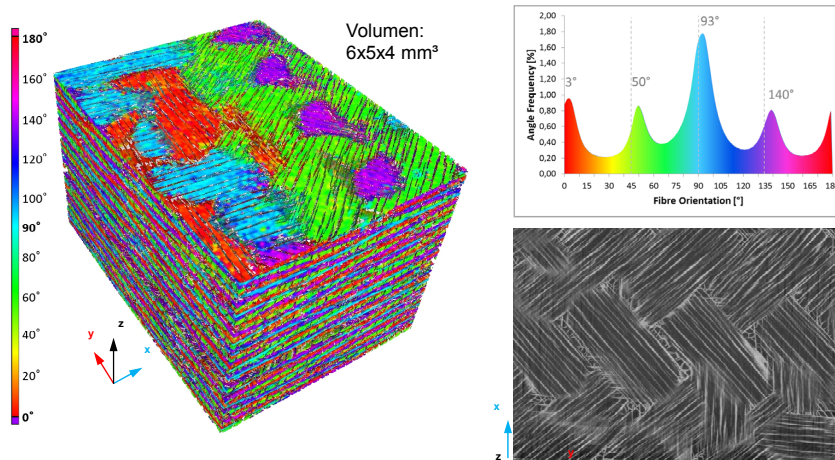


R. Jemmal et al., Characterization of complex pore networks in carbon preforms of MiCa-SiC ceramics on the basis of X-ray computed tomography. Industrial CT Scanning, Garching, Germany (2013)



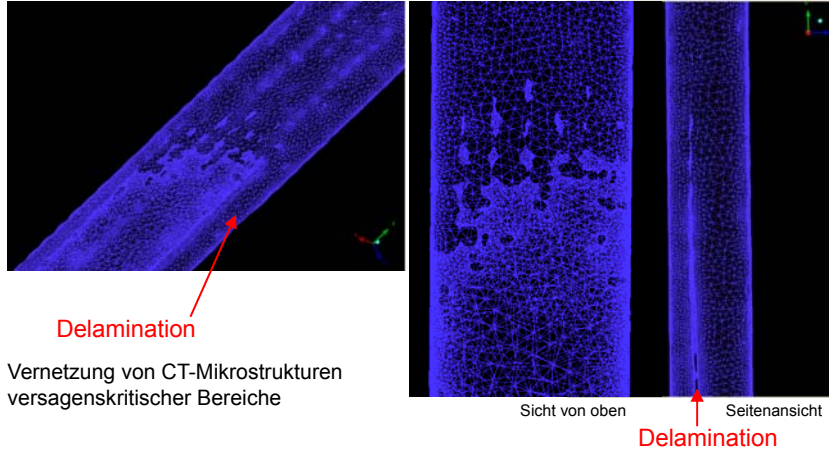
## Werkstoffcharakterisierung

### Lokale Faserorientierungsanalyse an C/C-SiC ( $\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ$ )



## Werkstoffcharakterisierung

Modellierungsansatz von intralaminaren Fehlstellen



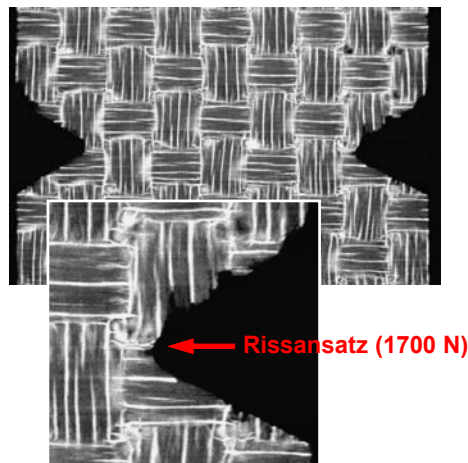
Vernetzung von CT-Mikrostrukturen versagenskritischer Bereiche



*T. Ullmann et al., Computed Tomography for Non-destructive Inspection of Hot Structures and TPS Components, 6<sup>th</sup> European Workshop On Thermal Protection Systems and Hot Structures, Stuttgart (2009)*

## Werkstoffcharakterisierung

In-situ CT zur Detektion von Fehlstellenausbreitung



*Bildquelle: P. Rauhut, R. Jemmal, Entwicklung einer In Situ Zugvorrichtung für Computertomographen (2011)*

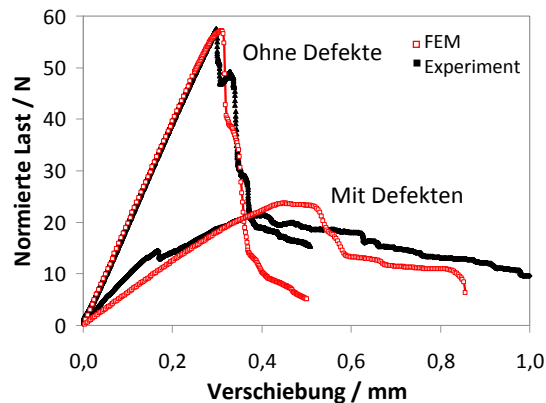
## Werkstoffcharakterisierung

Fehlerrelevanz

Berechnung des bruchmechanischen Verhaltens von Proben mit interlaminaren Defekten

Defektinformationen aus CT-Analysen

Übertragung auf bruchmechanische Finite-Elemente-Modelle



Messung u. Modellierung nach S. Hofmann (2013)



## Zusammenfassung

- CT eignet sich zur **Auffindung** und **systematischen Charakterisierung** von **Fehlstellen**, sowie **charakteristische Gefügeeigenschaften** und **Anomalien** eines Werkstoffs.
- Durch die hohe Auflösung können **Gefügekennwerte** und **-größen quantitativ erfasst** werden (z.B. Porosität, Porenmorphologie, Porendichtevertellung, Verformungsgrade, Texturen, Faserorientierung etc.).
- Die hohe Auflösung führt jedoch zu einem teils stark **eingegrenzten Analysevolumen**. Bei heterogenen u. stark texturierten Werkstoffen können so wertvolle Informationen verloren gehen.
- **Fehlstellenentstehung** und **-ausbreitung** können mittels in-situ Prüfmethode im CT untersucht werden
- Die Vernetzung der durch die CT erfassten Mikrostrukturen ist für eine **Werkstoffmodellierung** äußerst hilfreich. Ziel: Erfassung **kritischer Fehlergrößen** und **-typen** (Fehlerrelevanz).

