

## 3D-Synchrotron-Refraktions-CT 3D SyRef-CT

### Schlagwörter

Röntgenstreuung, Refraktion, 3D-Computer-Tomographie, Verbundwerkstoffe, Polymere, Metalle, zerstörungsfreie Charakterisierung

### Einsatzgebiete

Schadensanalyse, Werkstoffentwicklung, Qualitätssicherung, Luft- u. Raumfahrttechnik, Forschungsprojekte

### Prüfmethodik und Gerätetechnik

Dreidimensional ortsauflösende Computer-Tomographie mit grenzflächensensitivem Refraktionskontrast, Eigenbau aus Strahlrohr- und Kristallographiekomponenten

### Prüfobjekte

Faser-Komposite, Keramik, Metall, Zugprüfstäbe

### Prüfgrößen / Prüfmerkmale

3D-Rissverteilung, spezifische Oberfläche, Rissdichte, Rissorientierung, Faser/Matrix-Enthftung, dimensionales Messen

### Ergebnisunsicherheit / Zuverlässigkeit

Risserkennung ab 1 nm Rissöffnung, lineare Ortsauflösung bis zu 200 nm

### Qualifikation und Qualitätssicherung

BAM-eigene Verfahrensentwicklung, weltweit unikal, kommerziell nicht verfügbar

<b>Ansprechpartner:</b>	Dr. Bernd R. Müller	<b>Telefon:</b>	+49 30 8104 1852
<b>E-Mail:</b>	<a href="mailto:bernd.mueller@bam.de">bernd.mueller@bam.de</a>	<b>Fax:</b>	+49 30 8104 1837
<a href="#">Fachgruppe 8.5 Mikro-ZfP</a>		<a href="#">Zurück zur Startseite</a> <a href="#">Katalog der unikalenen Prüfeinrichtungen</a>	

## Ergänzende Angaben

Röntgen-Refraktion bezeichnet den Effekt der Brechung von Röntgenstrahlen an Grenzflächen und Oberflächen von Festkörpern und Flüssigkeiten [1]. Da der Brechungsindex für Röntgen-Energien oberhalb von 5 keV nur um etwa  $10^{-5}$  von Eins abweicht, tritt eine Streuung nur bei sehr kleinen Winkeln bis zu einigen Bogenminuten auf.

Die 3D-Synchrotron-Refraktions-Computer-Tomographie (3D\_SyRef-CT) ist eine Weiterentwicklung der im Labor entwickelten Refraktions-CT. Sie ermöglicht die selektive dreidimensionale Abbildung innerer Oberflächen in heterogenen Materialien mit hohem Kontrast, unabhängig vom konventionellen Dichtekontrast. Wegen der Nutzung monochromatischer Synchrotronstrahlung an der BAMline weisen die Messungen keine Aufhärtungseffekte auf.

Prinzip und Strahlengang der 3D-Synchrotron-Refraktions-CT sind in Bild 1 skizziert. Die BAMline [2] liefert mit Hilfe eines Doppel-Kristall-Monochromators (DCM) monochromatische Röntgenstrahlung im Energiebereich von 5 keV bis 80 keV mit geringer Winkel- und Energiebandbreite (0,2 %). Die Probe befindet sich in einem monochromatischen, parallelen Röntgenstrahl (Strahlquerschnitt ca. 7 mm (h) x 4 mm (v), abhängig von der Photonenergie). Ein Teil der Strahlung wird in der Probe absorbiert, und der transmittierte Teil wird über einen Analysatorkristall (z. B. Si(111)) auf einen Fluoreszenzschirm reflektiert. Der Fluoreszenzschirm ist über eine vergrößernde Optik an einen Flächendetektor (CCD) gekoppelt. Der Teil der Strahlung, der durch den Refraktionseffekt an inneren Grenzflächen gestreut wird, wird nicht vom zweiten Kristall reflektiert (rot gezeichnete Strahlen in Bild 1). Dies führt in den gemessenen Radiogrammen zu einem zusätzlichen Kontrast. In Analogie zu dem bekannten Prinzip der Computer-Tomographie wird die Probe in mehreren Winkelschritten um eine Achse gedreht. Je nach Fragestellung kann die Rotationsachse senkrecht, parallel oder in einem Winkel von  $45^\circ$  zur Streuebene des Analysatorkristalls orientiert sein. Aus dem gemessenen Datensatz lassen sich durch gefilterte Rückprojektion einzelne Schnittebenen rekonstruieren und zu einem 3D-Datensatz zusammenfassen (siehe Bild 2).

Da die Präparation zahlreicher Materialien für mikroskopische Untersuchungen zur Zerstörung der Mikrostruktur führt, besteht ein großes Interesse an der zerstörungsfreien Charakterisierung dieser Materialien. So können zum Beispiel herstellungsbedingte Inhomogenitäten von Werkstoffen und Korrelationen zu makroskopischen Eigenschaften erkannt werden. Die Ortsauflösung einer derartigen 3D-Synchrotron-Refraktions-Topographie erreicht  $5 \mu\text{m}$  (bzw. bis  $200 \text{ nm}$  mit Vergrößerung, s. u.), so dass einerseits Einzeldefekte wie Risse, Poren und Einschlüsse lokalisiert werden und andererseits die Grenzflächen-Dichte als Summe vieler Grenzflächen quantifizierbar wird.

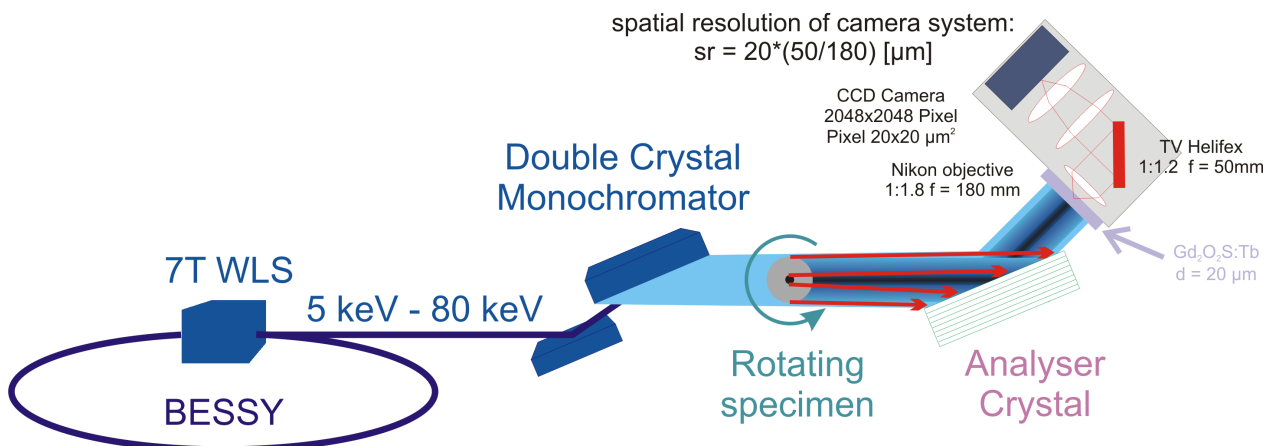
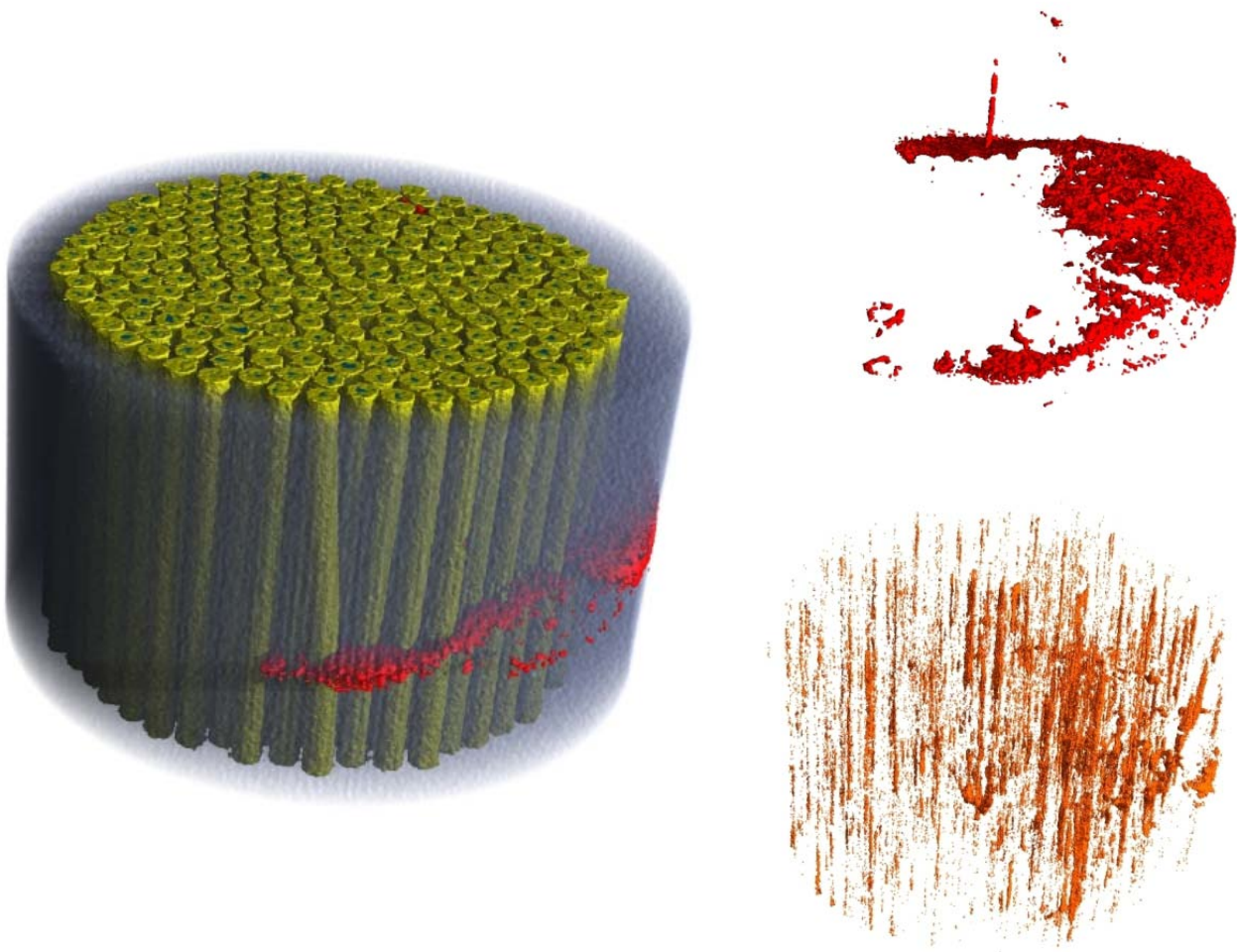


Bild 1: Prinzip und Strahlengang der 3D-Synchrotron-Refraktions-CT

Bild 2 links zeigt die 3D-Visualisierung des rekonstruierten Datensatzes eines belasteten (Low Cycle Fatigue) Zugstabs mit 3,6 mm Durchmesser bestehend aus SiC-Faser verstärktem Titan-Werkstoff (Ti-MMC). Die völlig andersartige Information des neuartigen Verfahrens ist offensichtlich. Die Synchrotron-Refraktions-CT detektiert die Rissausbreitung in der Ti-Matrix senkrecht zur Zugbelastung (roter Bereich), wenn die Rotationsachse parallel zur Streuebene des Analysatorkristalls orientiert ist. Bild 2 oben rechts stellt den aus dem Datensatz extrahierten Matrix-Riss separat dar. Ist die Rotationsachse der Probe senkrecht zur Streuebene orientiert (wie in Bild 1 dargestellt), so lassen sich die Belastungsrisse entlang des Faser-Matrix-Interfaces aus dem Datensatz separieren (siehe Bild 2 unten rechts).



**Bild 2:** Visualisierung des rekonstruierten Datensatzes einer Synchrotron-Refraktions-CT Messung (Photonenergie 50 keV). Untersucht wurde eine zyklisch belastete (Low Cycle Fatigue) Probe aus SiC-Faser verstärktem Titan-Werkstoff.

*Links:* Visualisierung des versagenden Bereichs der Zugprobe (Durchmesser: 3,6 mm). Die Ti-Matrix ist transparent dargestellt, der Matrixriss ist rot eingefärbt.

*Rechts oben:* Extraktion aller Risse mit Grenzflächen senkrecht zur Belastungsrichtung. Während der Messung ist die Rotationsachse parallel zur Streuebene des Analysatorkristalls orientiert.

*Rechts unten:* Extraktion aller Grenzflächen parallel zur Achse der Zugbelastung. Die Rotationsachse war während der Messung senkrecht zur Streuebene orientiert (wie in Bild 1 gezeigt).

In Abwandlung der Messanordnung in Bild 1 lässt sich durch den Einsatz eines asymmetrisch geschnittenen Analysatorkristalls (die Kristalloberfläche ist nicht parallel zu den reflektierenden Netzebenen, sondern steht in einem Winkel zu diesen) eine deutliche Vergrößerung innerhalb der Rekonstruktionsebene erzielen. Dadurch wird der Röntgenstrahl nach dem Probendurchgang aufgeweitet, und führt zu einer höheren Ortsauflösung innerhalb der rekonstruierten Schnittebene.

Bild 3 zeigt die Rekonstruktion einer vergrößernden 3D-Synchrotron-Refraktions-CT eines Mikrobohrers aus Stahl bei 45-facher Vergrößerung. Die dadurch erzielte lineare Auflösung in der horizontalen Schnittebene beträgt 200 nm (rechte Bildhälfte). Poren bzw. Werkstoffinhomogenitäten mit einem Durchmesser von weniger als 1 µm können detektiert werden.

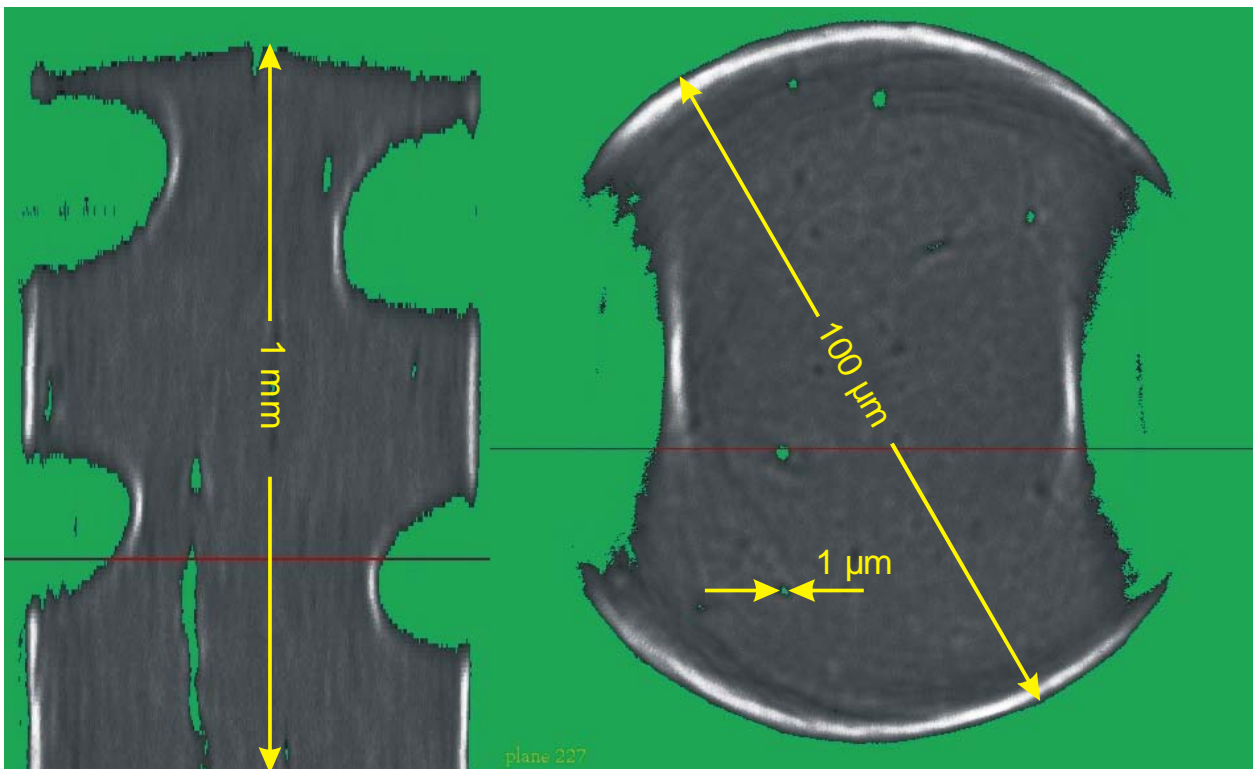


Bild 3: Rekonstruktion eines Mikrobohrers aus Stahl bei 45-facher Vergrößerung aus einem 3D Synchrotron-Refraktions-CT Datensatz.

*Links:* vertikaler Schnitt durch den Bohrer, Schnittebene parallel zur Bohrerachse,

*Rechts:* horizontale Schnittebene, Schnittebene senkrecht zur Bohrerachse.

Die rote Linie markiert die Schnittlinie der senkrecht aufeinander stehenden Schnittebenen.

### Literatur

- 1 Compton, A.H.; Allison, S.K.: X-ray in Theory and Experiment. Macmillan and Co. Ltd, London 1935
- 2 Görner, W.; Hentschel, M.P.; Müller, B.R.; Riesemeier, H.; Krumrey, M.; Ulm, G.; Dietsch, W.; Klein, U.; Frahm, R.: Nuclear Instruments and Methodes in Physics Research A467-468 (2001) 703