

Zerstörungsfreie Bauteilprüfung durch Neutronen- und Röntgenstrahlen an keramischen Faserverbundwerkstoffen im Bereich Raumfahrtantriebe

VDI-Expertenforum:
Moderne Schadensanalyse – mit Neutronenstrahlen

Dr. S. Schmidt, S. Beyer
TP32, EADS-Astrium

All the space you need





Ausgangssituation



Status NDI bei EADS-Astrium



Verfügbare CT-Anlagen

→ Röntgen

→ Synchrotron

→ Neutronen



CT Prüfung an unterschiedlichen Komponenten



Zusammenfassung und Ausblick

- **Notwendige zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) von CMC-Brennkammern und -Düsen, Ventilen etc.**
- **Neuartige Prüf- und Auswertemethoden (3D)**

- **Fehlerdetektion, -qualifizierung und – quantifizierung mit Hilfe der Computertomographie**
- **„Einfache“ Kombination mit Konturvermessung, Soll/Ist Abgleich mit CAD-Daten möglich**

Einführung und Qualifikation der Computertomographie zur Qualitätssicherung in der Kleinserien-Bauteilfertigung* (CMC)

*Reduzierung von Prüfkosten und Vermessungsaufwand

➤ Zerstörungsfreie Bauteilprüfung über :

- 2D-Ultraschallscans
- 2D-Röntgen-Bilder
- 2D-Thermographie
- Flowchecks

➤ Computertomographie

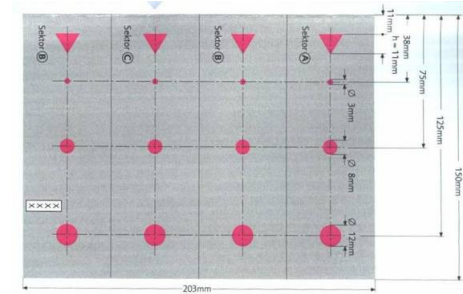
- Anregung durch verschiedene Strahlenquellen

➤ 3D-Vermessung:

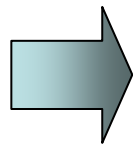
- Messmaschine/Messtaster
- Messprogramm



Fehlerkatalog



Platten mit künstl. Fehlstellen



Kombination von zerstörungsfreier Prüfung und 3D-Vermessung möglich



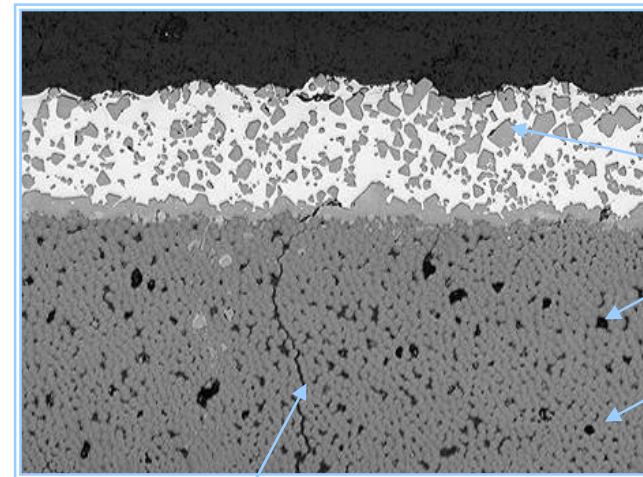
This document is the property of Astrium. It shall not be communicated to third parties without prior written agreement. Its content shall not be disclosed.

Mikrostruktur von C/SiC, C/C

Die C/SiC Struktur weist natürliche Defekte auf, wie z.B.:

- Matrixinhomogenitäten (z.B. Mikrorisse und Poren)
- Fasereinflüsse (z.B. Faser-volumenanteil, Faserorientierung)
- Elementverteilung (C/SiC /Si)

Diese Defekte sind oft komplex und verteilt im Material → **erfordert hochauflösende Detektionsmethoden**



Status

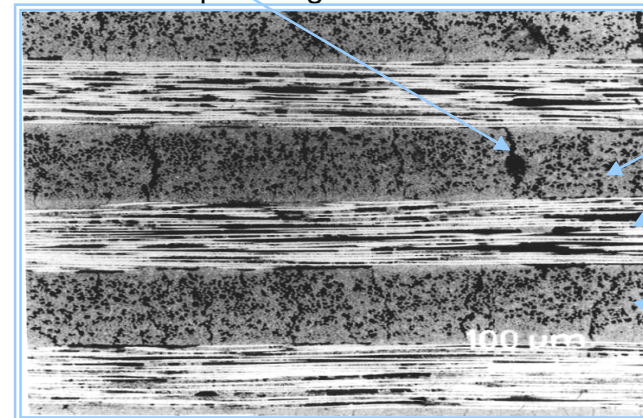
CARBOTEX®SI
(C/C-SiC)

SiC oberflächen-schicht

Pore (Hohlraum)

C/C Struktur

Entspannungsriß



SICARBON®
(C/SiC)

Pore (Hohlraum)

C-Faserbündel

C-Matrix

Typisch für in den Raumfahrtapplikationen zur Anwendung kommenden Metalle ist die hohe Dichte

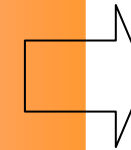


CT mittels Neutronen notwendig

Funktionsprinzip der CT: Anregungsquellen

Röntgenstrahlen

- verbreiteste Strahlung
- kegelförmig austretend
- Streuung oder Absorption an Elektronen



**kostengünstig
schnell**

Neutronen

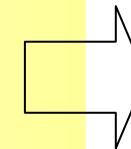
- parallele austretende Neutronenstrahlen
- Streuung oder Absorption an Atomkernen



**hohe Kosten
unabhängig von
Materialdichte**

Synchrotronstrahlung

- extrem paralleler Strahl → hohe Auflösungen
- hohe Intensität → rauscharme Bilder
- Durchstrahlungsenergie kann bauteilspezifisch variiert werden



**hohe Kosten
nur kleine BT-
Volumen prüfbar**

This document is the property of Astrium. It shall not be communicated to third parties without prior written agreement. Its content shall not be disclosed.

Daimler

Röhren: Microfocus 225 kV Brennfleck 10 μ m
Minifocus 450 kV Brennfleck 0,4mm

Ortsauflösung: 200x200 μ m bei Vergrößerung 1; 100-fache optische Vergrößerung möglich (Microfocus) → sehr kleine Bauteile

Dynamik: 16 bit

Durchdringung: ca. 250 mm Al, ca. 50 mm Stahl

Detektoren: Flächendetektor 400x400 mm mit 2048x2048 Pixel (640 mm Zeilendetektor mit 8000 Pixel)

Bauteilgröße: 800x800x800 mm mit Messkreiserweiterung

Rechner: Rekonstruktion: Cray T3E (HWW BW); Cluster (Siemens HPC-Line) mit 64 CPUs

Zeiten: Messzeit ca. 10-20 min für Standardmatrix
Rekonstruktionszeit für Messung mit 2880 Projektionen ca. 3,5 h

Kosten: 2.1 Mio DM Invest (CT-Anlage inkl. Abschirmung)

Durchsatz pro Monat: ca. 150 Messungen

Verfügbare Anlagen

YXLON-Kundenspezifische industrielle CT-Systeme



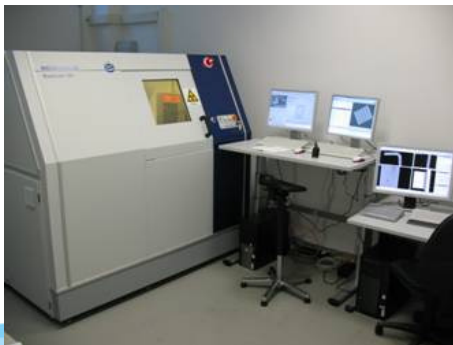
EADS-IW OTN

■ System : RayScan 150 – Wälischmiller

- Röntgenquelle: VISCOM
 - Microfokus Röhre: 10 kV – 225 kV
 - Sub-Microfokus Röhre mit Diamant-Target: 10 kV – 160 kV
 - Fokusgrösse: 1 μm – 250 μm
- Detektor:
 - Perkin Elmer 1024 x 1024 à 200 μm DRZ, 16 bit
- Software von Wälischmiller, Fraunhofer und Volume Graphics
- Manipulator: 2 translatorische Achsen (Genauigkeit: 1 μm) und 1 Rotationsachse

■ Komponentenvolumen und -gewicht:

- H= 300 mm, \varnothing = 200 mm / 20 kg



This document is the property of Astrium. It shall not be communicated to third parties without prior written agreement. Its content shall not be disclosed.

Verfügbare Anlagen

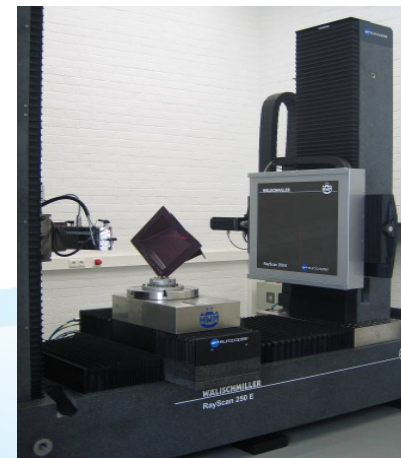
EADS-ECD OTN

■ System RayScan 250E - Wälischmiller

- Röntgenquelle: VISCOM
 - Microfokus Röhre: 10 kV – 225 kV
 - Fokusgrösse: 5 μm – 250 μm
- Detektor:
 - Perkin Elmer 2048 x 2048 à 200 μm DRZ, 16 bit
- Software und Rekonstruktion:
 - Wälischmiller, Fraunhofer und Volume Graphics
- Manipulator:
 - 6 translatorische Achsen (Genauigkeit: 1 μm) und 1 Rotationsachse

■ Komponentenvolumen und -gewicht:

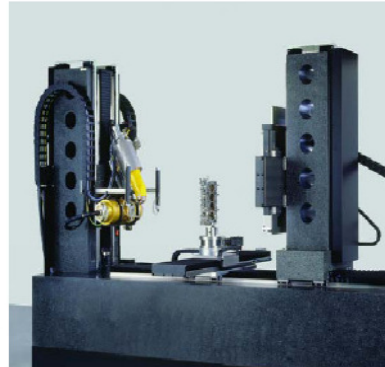
- H= 2400 mm, \varnothing = 700 mm / 80 kg (3D-CT)
- H= 2500 mm, B= 3500 mm (Transversal-CT)



CT-Großanlage – v|tome|x L450

Große Anlage zur 3D-CT Analyse und Radiographie an Bauteilen und komplexen Strukturen aus:

- Metall
- Keramik
- Faserverbundwerkstoffen
- hybriden Werkstoffen
- Kunststoffen



Röntgenröhren:	240 kV Mikrofokus bzw. 450 kV Minifokus
Flächendetektor:	2048 x 2048 Pixel à 0.2 mm (16 Bit)
Max. Voxel-Auflösung:	ca. 5 µm (Mikrofokus)
Max. erfassbarer Bauteilbereich:	B = 800 mm (horizontal); H = 1000 mm (vertikal)
Max. Bauteilgröße:	ca. 1000 x 1700 mm (B x H)
Max. Bauteilgewicht:	100 kg
Hersteller:	Phoenix x-ray

Verfügbare Anlagen

Hochauflösende CT-Anlage – Nanotom 180NF

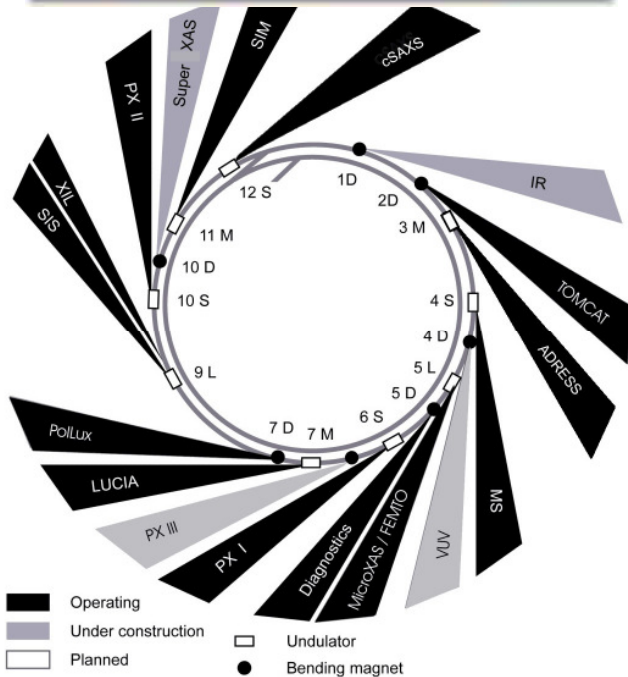
CT-Anlage zur hochauflösenden 3D-CT Analyse von Feinstrukturen aus:

- Metall
- Keramik
- Faserverbundwerkstoffen
- hybriden Werkstoffen
- Kunststoffen
- elektronischen Bauteilen (Sensoren)



Röntgenröhren:	180 kV high power nanofocus™
Flächendetektor:	2300 x 2300 Pixel à 0.05 mm (12 Bit)
Max. Voxel-Auflösung:	ca. 2 µm
Min. Brennfleckdurchmesser:	0.9 µm
Max. Probendurchmesser:	ca. 100 mm
Max. Probengewicht:	1 kg
Hersteller:	Phoenix x-ray

PSI (SLS)



This document is the property of Astrium. It shall not be communicated to third parties without prior written agreement. Its content shall not be disclosed.

Verfügbare Anlagen

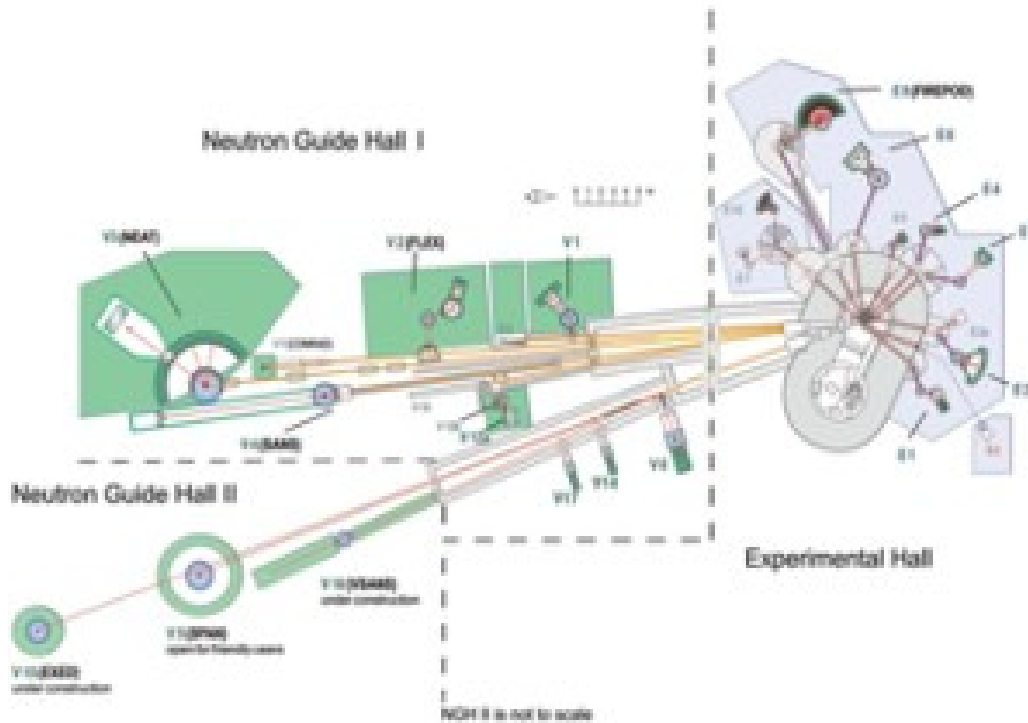
HMI (BESSY)

Instrumente

- UE46-PGM
- S1** Requests for beamtime should be directed to BESSY:
- MagS
- S2** Requests for beamtime should be directed to BESSY:
- ASAXS / GISAXS
- S3** Requests for beamtime should be directed to BESSY:
- EDDI
- S4** Requests for beamtime should be directed to BESSY:
- Tomography@BAMline
- S5** Requests for beamtime should be directed to BESSY:

HMI (BENSC)

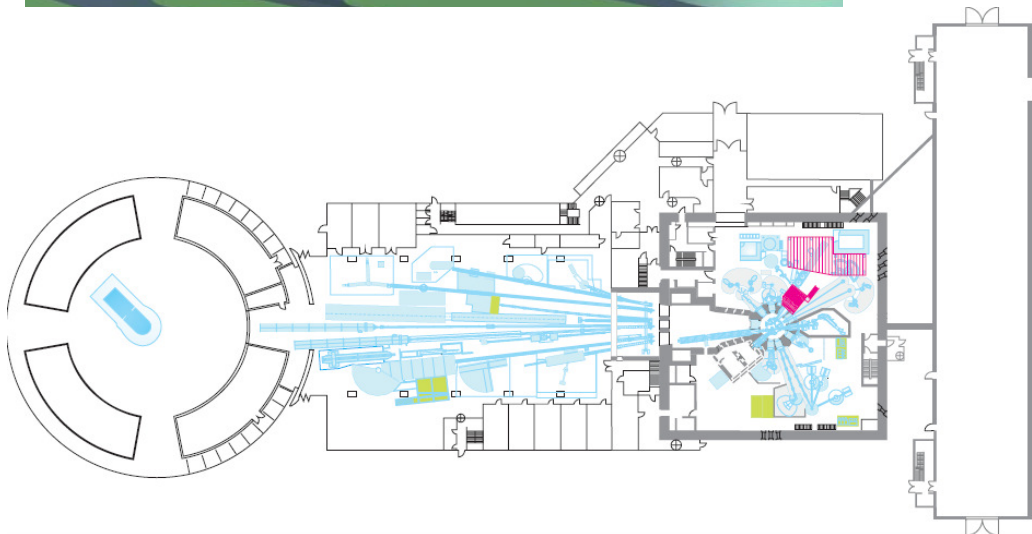
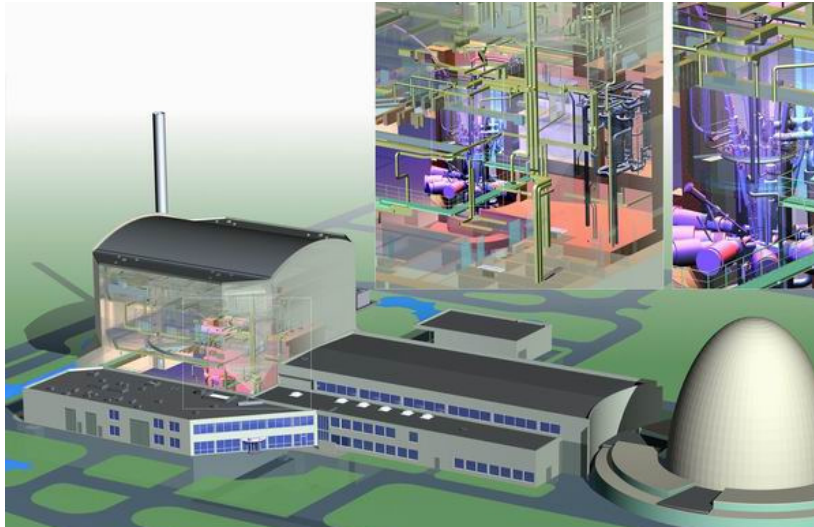
This document is the property of Astrium. It shall not be communicated to third parties without prior written agreement. Its content shall not be disclosed.



Verfügbare Anlagen

- E2** Flat-Cone Single Crystal and Powder Diffractometer
- E3** Residual Stress Analysis and Texture Diffractometer
- E4** 2-Axis-Diffractometer
- E5** 4-Circle Diffractometer
- E6** Focusing Single Crystal Diffractometer
- E7** Residual Stress Analysis Diffractometer
- E9** Fine Resolution Powder Diffractometer (FIREPOD)
- V7** Cold Neutron Tomography and Radiography (CONRAD)
- B8** Neutron-Autoradiography

FRM II



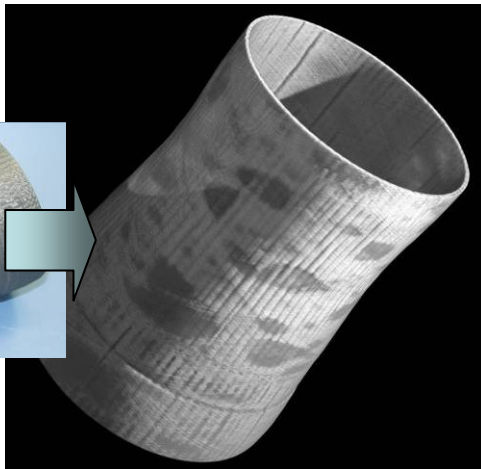
- PANDA
- STRESS-SPEC**
- ANTARES**
- NEPOMUC
- TRISP
- PUMA
- SPODI
- RESI
- HEIDI
- MEDAPP
- NECTAR**

This document is the property of Astrium. It shall not be communicated to third parties without prior written agreement. Its content shall not be disclosed.

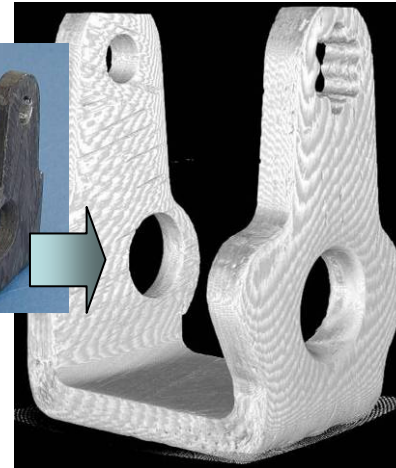
Typische Vorgehensweise zur Auswertung der CT-Daten :

→ **ASTRIUM OTN (Hard- und Software vorhanden)**

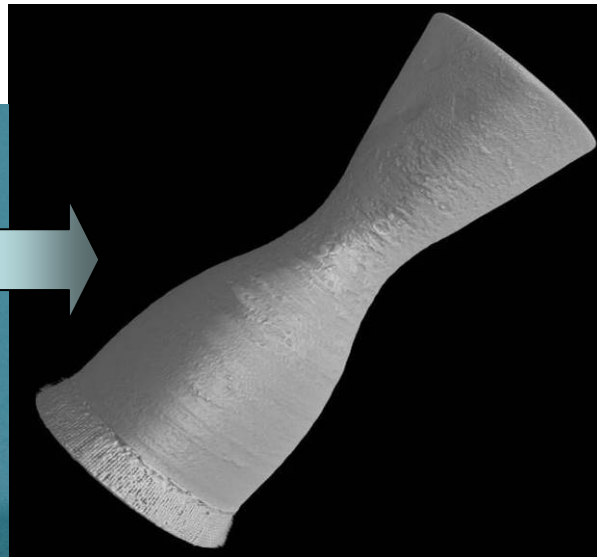
- 1. Visualisierung des „Messobjekts“**
- 2. Kalibrierung der Voxel-Daten**
- 3. „Manuelle“ Vermessung des Volumenkörpers**
- 4. Defektanalyse (Fehlerprotokoll mit Defektgrößen und Defektposition)**
- 5. ggf. Erstellung von Analysebildern/Animationsfilmen**
- 6. Wandstärkenanalyse**
- 7. Automatisierte 3D-Vermessung (mit Messprotokoll) und evtl. Soll/Ist-Abgleich**



Flugkörperdüse



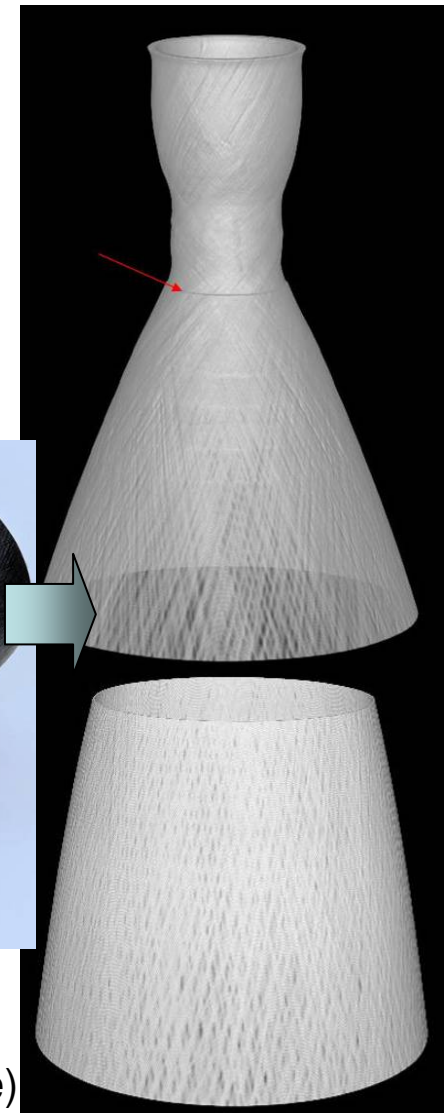
Gasgeneratorkomponenten



Brennkammer 400N

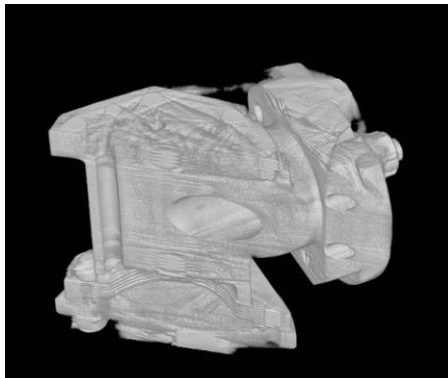


EAM – European Apogee-Motor (Brennkammer & Düse)

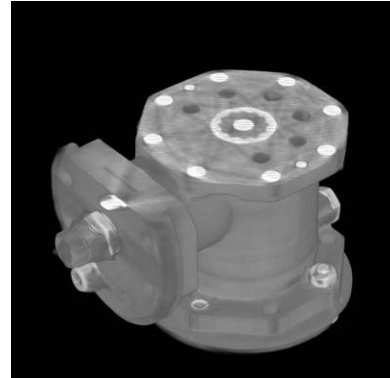


This document is the property of Astrium. It shall not be communicated to third parties without prior written agreement. Its content shall not be disclosed.

PPH-Ventil



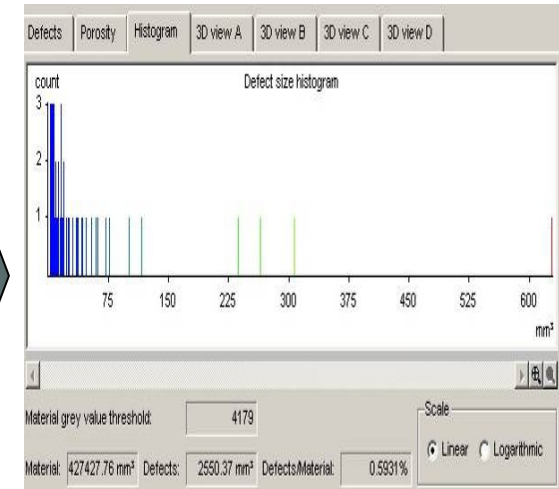
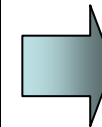
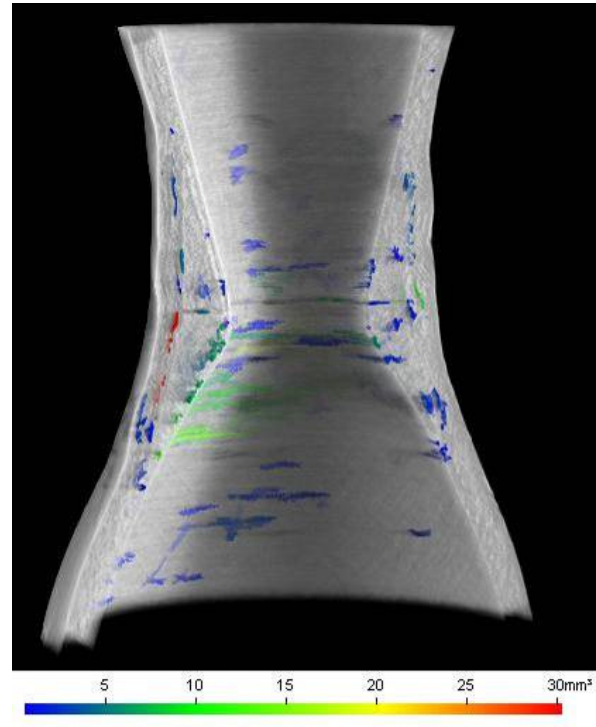
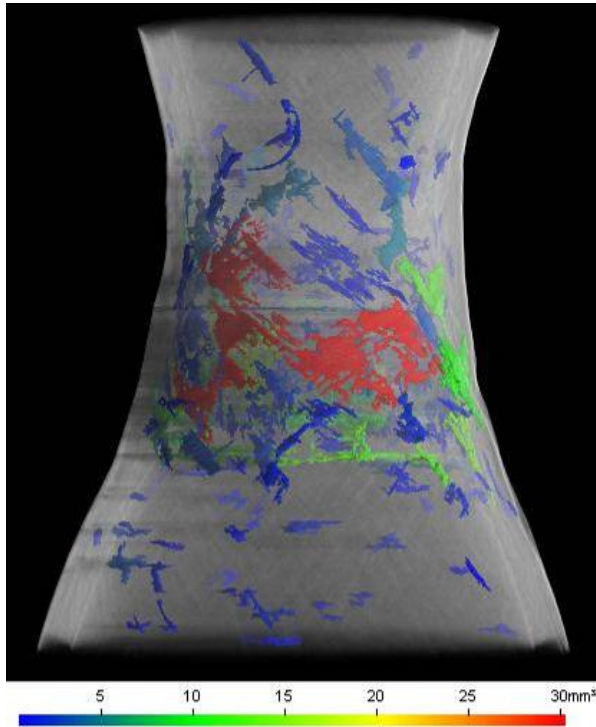
Microfocus-CT (220keV)



Minifocus-CT (450keV)

This document is the property of Astrium. It shall not be communicated to third parties without prior written agreement. Its content shall not be disclosed.

Defektanalyse



Histogramm zu Fehlergrößen

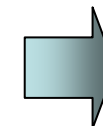
This document is the property of Astrium. It shall not be commu

Defektbild:

- Material transparent
- Farbskala entspricht Fehlervolumen

Defektbild:

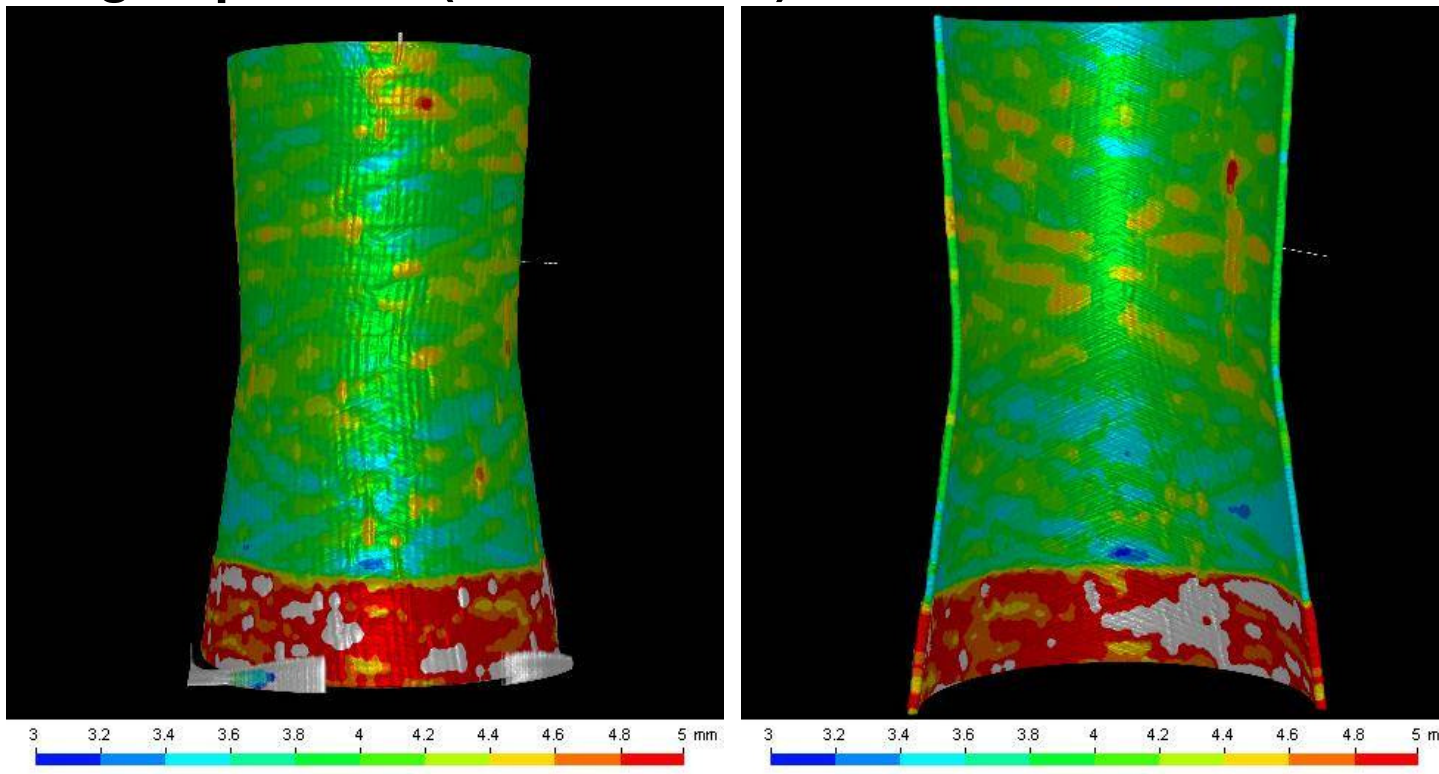
- Material transparent
- Farbskala entspricht Fehlervolumen
- Schichttiefe der Fehler



Defektreport

- vorab definierte Wandstärken werden detektiert; die Abweichungen vom definierten Wert werden durch Farbcodierung bewertet

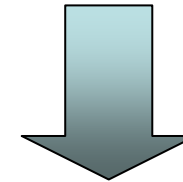
Flugkörperdüse (unbearbeitet)



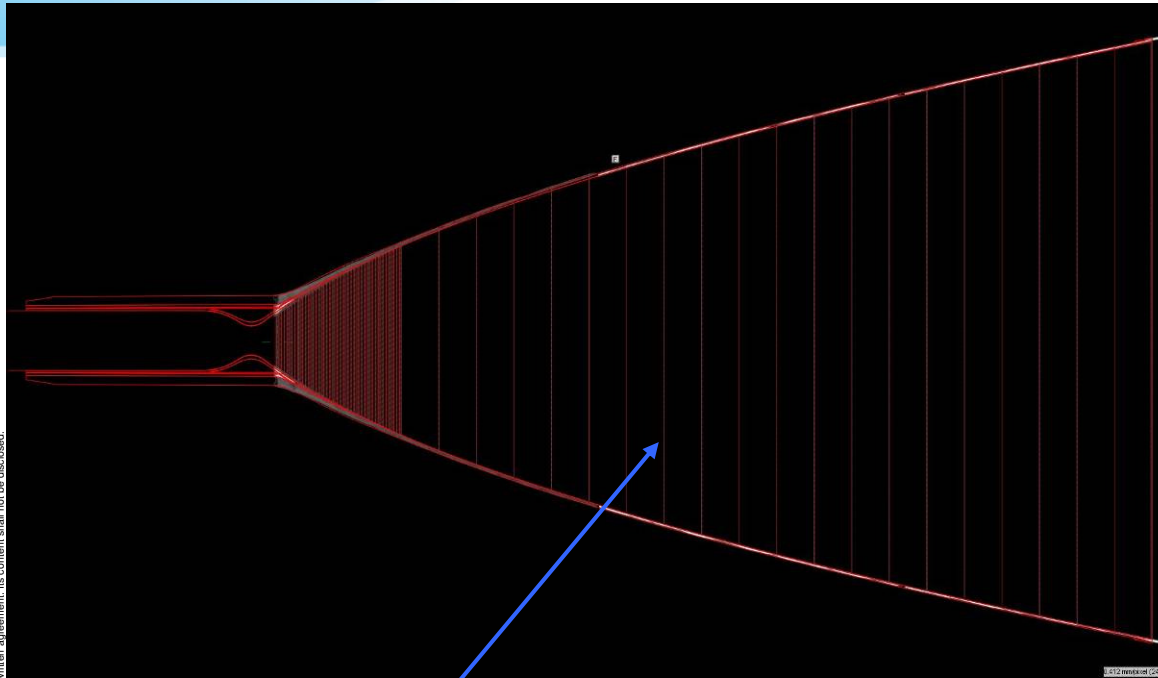
This document is the property of Astrium. It shall not be communicated to third parties without prior written agreement. Its content shall not be disclosed.

3D-Vermessung

Beispiel:
EAM-Hardware



Ergebnis:
Excel Tabelle mit
Messwerten

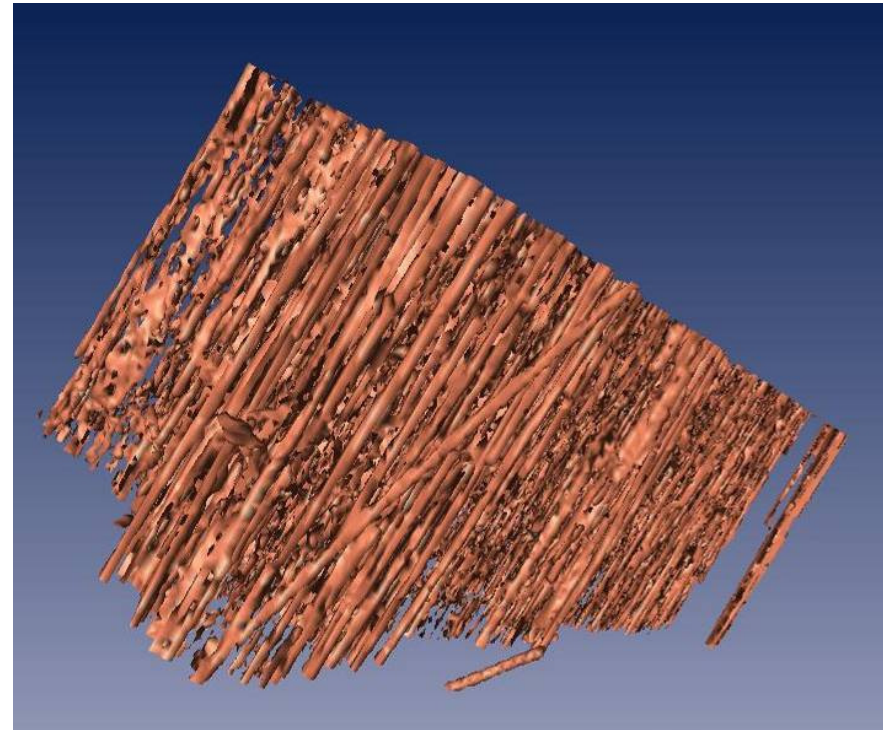


**Messebenen
bzw. Messzylinder**

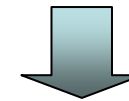
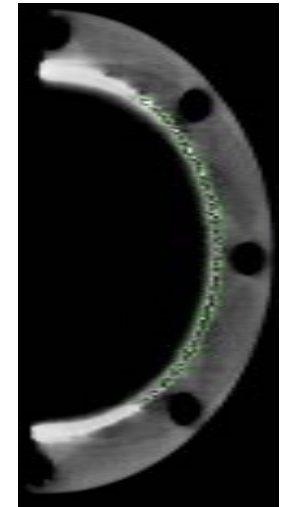
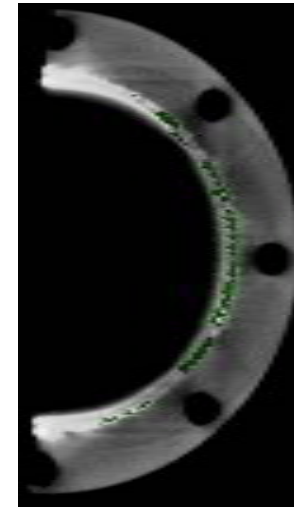
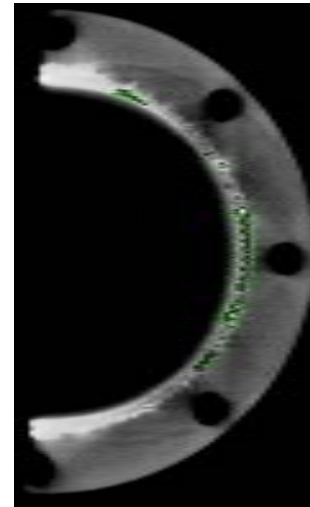
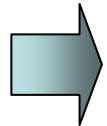
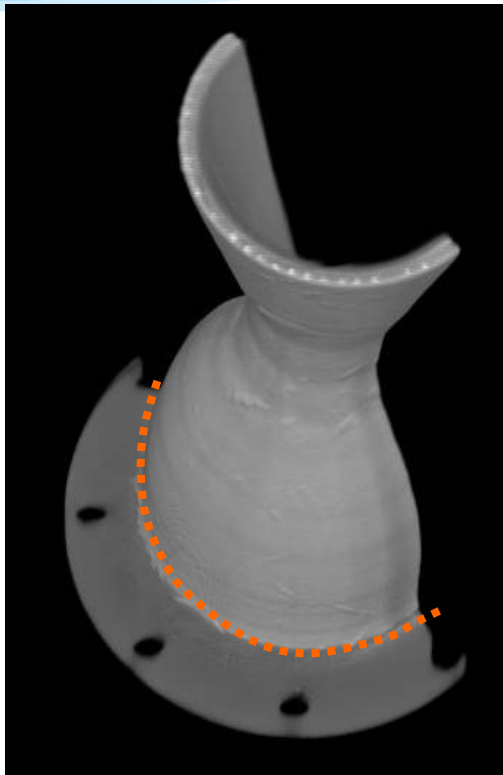
This document is the property of Astrium. It shall not be communicated to third parties without prior written agreement. Its content shall not be disclosed.

Mit Hilfe der Synchrotrontomographie können Porosität, Mikrorissigkeit und mögliche minimale Defekte im Material detektiert werden.

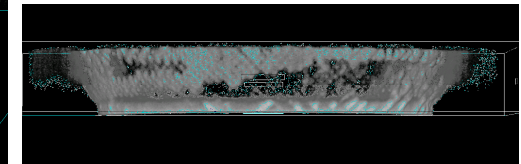
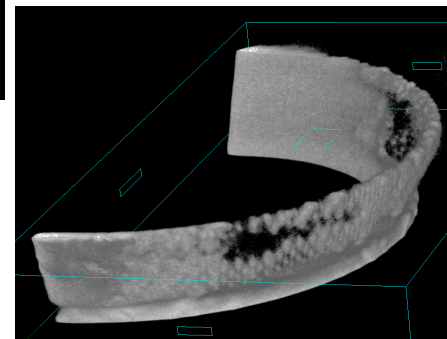
- **derzeitige Auflösungsgrenze bei ca. 1 μm**
- **Prüfvolumen max. 3mm³**



Synchrotronbild C/SiC



Lot extrahiert



This document is the property of Astrium. It shall not be communicated

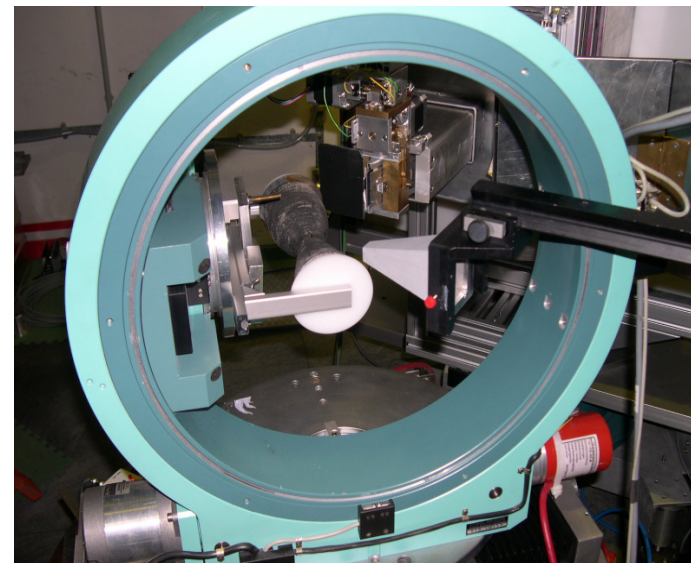
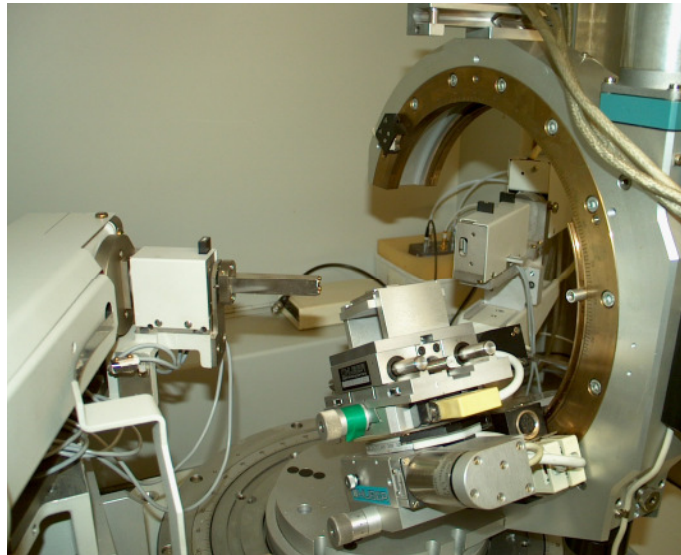
Schutzschichtsystem!!!

Ziel der Auswertung:

Visualisierung der Verbindungszone zwischen C/SiC und Niobring

Röntgen- und Neutronendiffraktometrie:

Phasen- und Eigen Spannungsanalysen an C/SiC-Material



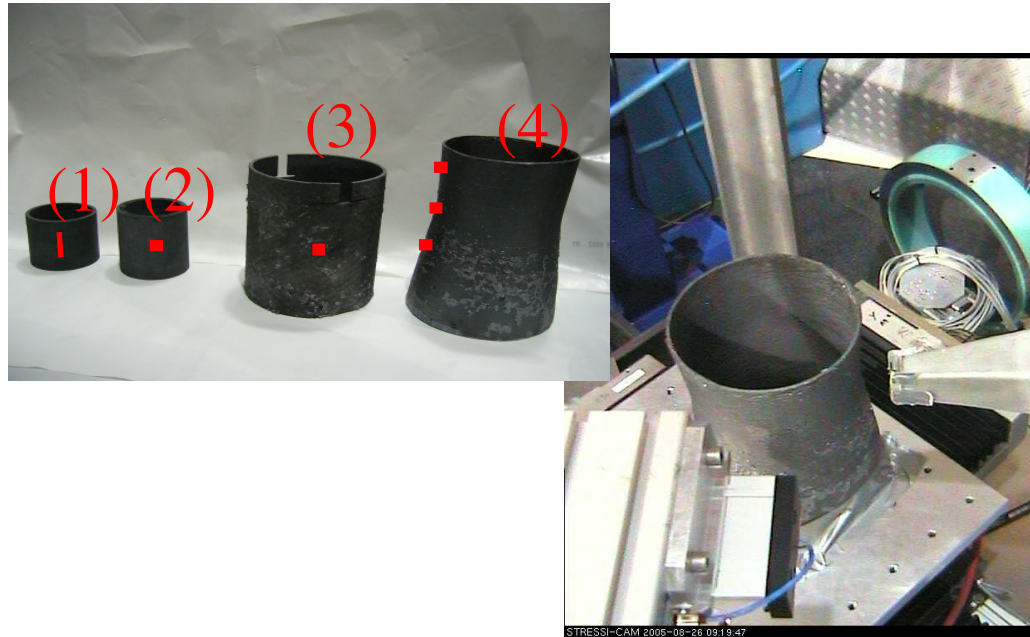
Röntgenanlage Maschinenwesen-TUM
Probe u. Bauteile

Stress Spec - FRM2 – TUM
Neutronenanlage

Punkte [mm]	σ_{Radial} [MPa]	Fehler [MPa]	σ_{Axial} [MPa]	Fehler [MPa]	σ_{Tang} [MPa]	Fehler [MPa]
4	0	27	10	27	18	27
6	7	27	14	27	19	27
8	2	27	9	27	9	27

This document is the property of Astrium. It shall not be communicated to third parties without prior written agreement. Its content shall not be disclosed.

Röntgen- und Neutronendiffraktometrie:

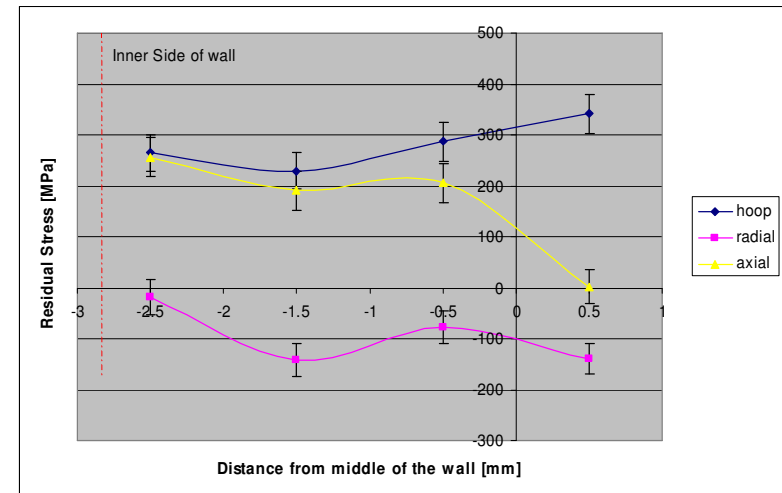


Probe 1: Scan entlang Längsachse
u. durch die Wand

Probe 2: Scan durch die Wand
(gemessen bei 2 versch. Wellenlängen)

Probe 3: Scan durch die Wand

Probe 4: Messung an 3 Punkten



Probe 2 (Mitte Wand):

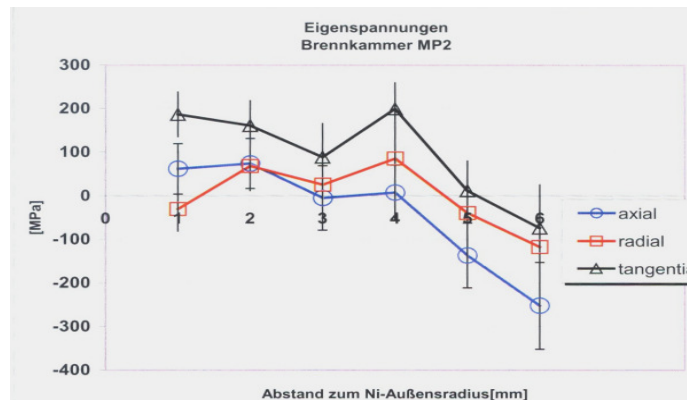
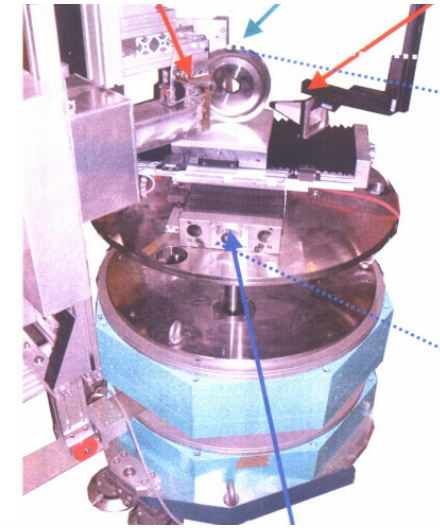
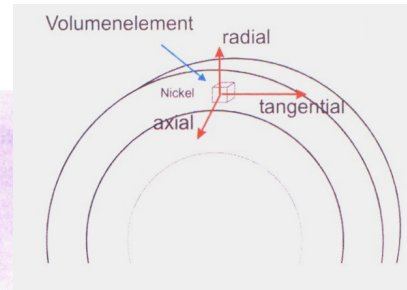
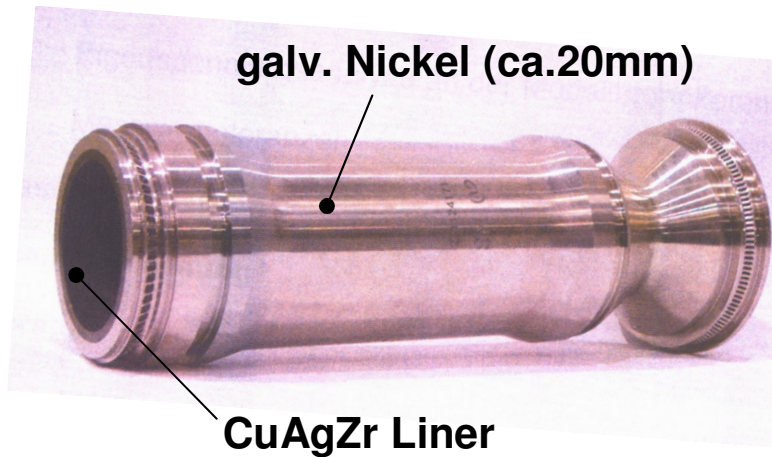
$$RS_{\text{tangential}} = 250 \pm 37 \text{ MPa}$$

$$RS_{\text{radial}} = -51 \pm 37 \text{ MPa}$$

$$RS_{\text{axial}} = 38 \pm 45 \text{ MPa}$$

Eigen Spannungsmessungen

Neutronendiffraktometrie an einer Modellbrennkammer:



Abstand zum Ni-Außenradius	Axial	Radial	Tangential
1.0 mm	62 ± 58 MPa	-30 ± 51 MPa	186 ± 51 MPa
2.0 mm	74 ± 57 MPa	69 ± 57 MPa	161 ± 57 MPa
3.0 mm	-5 ± 74 MPa	26 ± 77 MPa	88 ± 77 MPa
4.0 mm	7 ± 63 MPa	86 ± 60 MPa	199 ± 68 MPa
5.0 mm	-137 ± 74 MPa	-39 ± 75 MPa	11 ± 60 MPa
6.0 mm	-253 ± 99 MPa	-117 ± 109 MPa	-75 ± 100 MPa

This document is the property of Astrium. It shall not be communicated to third parties without prior written agreement. Its content shall not be disclosed.

- 👍 **Röntgen-CT** geeignet für C/SiC-Prüfung aufgrund:
 - Defektanalysen: Fehlerdetektion, -qualifizierung und –quantifizierung
 - Visualisierungen der Analyseergebnisse
 - Wandstärkenanalysen
 - Vermessungen der untersuchten Objekte mit automatisiertem Soll/Ist-Abgleich
- 👍 **Synchrotron-CT** zeigt eine hohe Brillanz sowie einen starken Kontrast
- 👍 **Neutronen-CT** ist geeignet für Prüfung von Materialien mit hoher Dichte, z.B. C/SiC-Metall-Verbindungen
- 👍 **Die Ermittlung von Eigenspannungen** sowohl im C/SiC Material als auch in raumfahrttypischen Metallen ist möglich