

RoboCT und Tomosynthese – Laminographische Mikro-CT großer Faserverbundbauteile aus der Luftfahrt

Wolfgang HOLUB, Richard LINKE, Mahmoud AMR, Virginia VOLAND, Ulf HAßLER
Fraunhofer-Entwicklungszentrum Röntgentechnik EZRT, Fürth

Kurzfassung

Im modernen Flugzeugbau werden zunehmend Bauteile aus faserverstärkten Kunststoffen (FVK) eingesetzt.

Composit-Materialien wie kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK) bieten dem Konstrukteur bei gleicher Belastbarkeit eine deutliche Gewichtseinsparung und helfen so, effiziente, verbrauchsarme Flugzeuge zu entwickeln. Insbesondere Flügelteile, Klappen, Spoiler und Rumpfsegmente werden aus Carbon gefertigt.

FVK erhalten ihre besonderen Eigenschaften durch die Einbindung von Kohle- oder Glasfasern in eine Kunststoff-Matrix. Die gezielte Anordnung der verstärkenden Fasern verleiht dem Bauteil seine hohe Belastbarkeit.

Im Unterschied zu homogenen Werkstoffen muss ein Verbundbauteil auf deutlich kleinere Fehler geprüft werden, welche die Eigenschaften des Verbundes negativ beeinflussen können. Bei diesen Fehlern handelt es sich um Lunker, Porositäten, Einschlüsse, Risse oder Delaminationen, die zum Versagen der Verbindung führen können sowie um Abweichungen im Aufbau der Faserlagen wie Welligkeiten oder deren Orientierung. Am weiter verarbeiteten Bauteil kommt der Bedarf zur Prüfung von Klebeverbindungen hinzu.

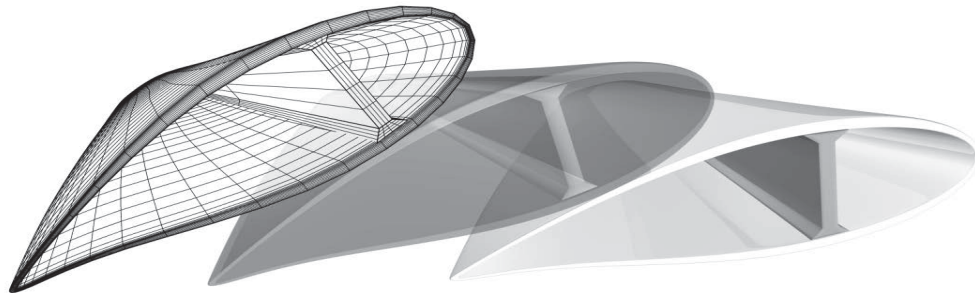
Bei der Prüfung ergibt sich die Herausforderung, hochaufgelöste Mikro-Computertomographie (μ CT) an teils mehrere Meter langen Bauteilen durchführen zu müssen.

Im Forschungsprojekt QUICOM, das von der EU im siebten Forschungsrahmenprogramm gefördert wird erforschen wir die Untersuchung solcher Bauteile mit Methoden der Röntgenlaminographie. Ohne vollständige Information für eine 3D-Computertomographie zu erfassen gelingt es dennoch, an ROIs nahezu beliebig großer und zugleich flacher Objekte dreidimensionale Aufnahmen mit den notwendigen hohen Auflösungen zu erreichen. In diesem Beitrag stellen wir die roboterbasierte Computertomographie (RoboCT) vor, mit der sich sehr flexible Trajektorien zur Laminographie an großen oder komplexen Bauteilen abbilden lassen und vergleichen die resultierenden 3D-Bilder mit Aufnahmen an einer μ CT Laboranlage mit mächtigen, für die Tomosynthese optimierten Verfahrenen. Die unvollständige Tiefeninformation dieser Laminographien kompensieren wir durch die Einbeziehung von Oberflächeninformation. Wir demonstrieren die Ergebnisse der mittels Tomosynthese und Algebraischer Rekonstruktion gewonnenen Daten.



ROBO-CT UND TOMOSYNTHESE - LAMINOGRAPHISCHE MIKRO-CT

an großen Faserverbundbauteilen aus Luftfahrt und Windkraft



Dr. Ulf Haßler, Wolfgang Holub, Virginia Volland, Mahmoud Amr, Richard Linke
Fraunhofer IIS/EZRT, Fürth
2015-05-12 DACH Tagung 2015, Salzburg

© Fraunhofer

 **Fraunhofer**
EZRT

© Fraunhofer

 **Fraunhofer**
EZRT

Robo-CT und Tomosynthese - Laminographische Mikro-CT

- Motivation
- Grundlagen – Laminographie
- Tomosynthese und RoboCT an einer CFK-Landeklappe
- Regularisierung durch Nutzung der Oberflächeninformation
- Zusammenfassung

Motivation

- Faserverstärkte Kunststoffe erlauben den Bau höchst belastbarer Bauteile bei zugleich geringem Gewicht
- Die Eigenschaften und damit eine zuverlässige und effiziente Produktion hängen sehr von der inneren Struktur des Composites ab
- → Qualitätssicherung mit ZfP und automatischer Auswertung



Motivation

QUICOM: X-ray inspection of CFRP aerospace parts

■ Stand der Technik: Ultraschall Prüfung

- Nachteile:
 - Prüfzeiten
 - Gekrümmte Oberflächen, stark variierende Geometrien
 - Begrenzte Auflösung
- Etablierung Röntgeninspektion als ergänzende oder alternative Methodik

■ EU Projekt **QUICOM** (w3.quicom.eu), 2012 - 2015

■ Partner:

- Airbus, FACC, LAC, VG
- FHW, CEA, CTU, KUL, UPAT, FHG



■ Projektschwerpunkte:

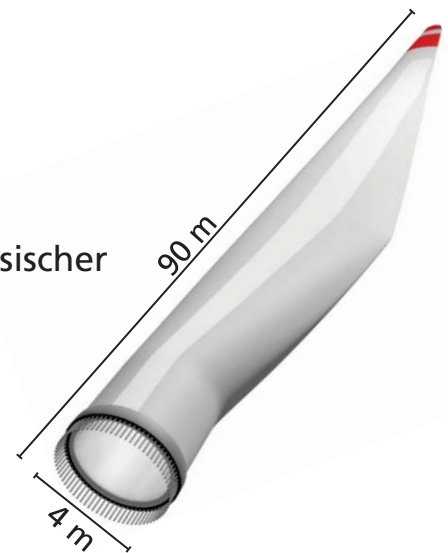
- Materialcharakterisierung, Modellierung, Datenauswertung
- Schnelle Prüfung, Hybridbauteile, Große und komplexe Bauteile (WP 6)

Motivation

Große Bauteile

■ Große moderne Komposit-Bauteile sind mit klassischer Computertomographie nicht mehr handhabbar

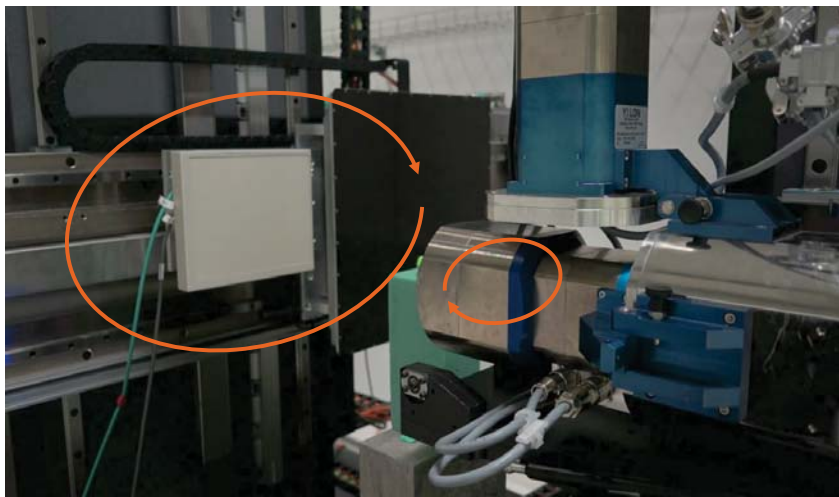
- Landeklappen usw.
- Flugzeugrumpfsegment
- Windkraft Rotorblatt
- KFZ-Karosserie



Robo-CT und Tomosynthese - Laminographische Mikro-CT

- Motivation
- Grundlagen – Laminographie
- Tomosynthese und RoboCT an einer CFK-Landeklappe
- Regularisierung durch Nutzung der Oberflächeninformation
- Zusammenfassung

Grundlagen I Zirkuläre Laminographie



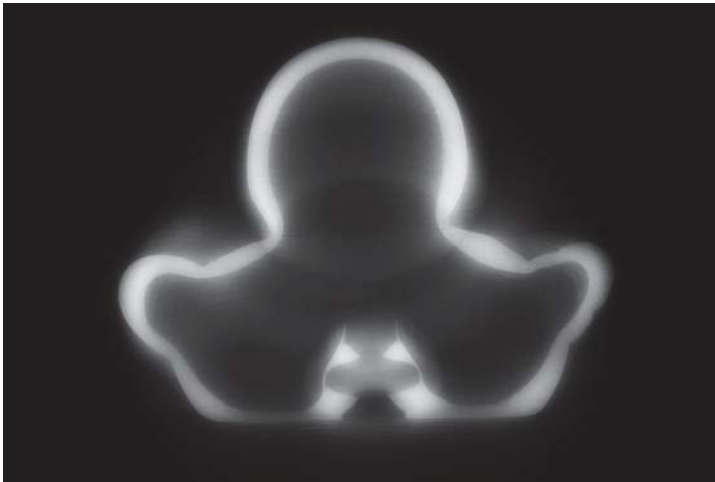
- Objekt stationär, Röhre und Detektor bewegen sich auf parallelen Bahnen
- Stapel von Schichtbildern mit sehr hoher Schichtauflösung, aber begrenzter Tiefeninformation
- Eingeschränkt dreidimensionale Prüfung großer, flacher Objekte
- Spezielles Rekonstruktionsverfahren: Tomosynthese

Grundlagen II

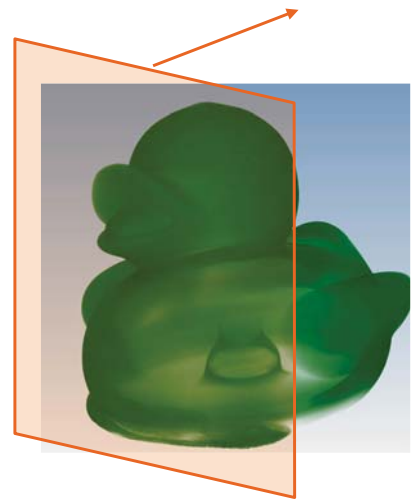
Laminographie

Tomosynthese

- dreidimensionaler Stapel von Schichtbildern
- erlaubt frontale Schnitte durch das Objekt



- Schnittbilder sind leicht artefaktbehaftet

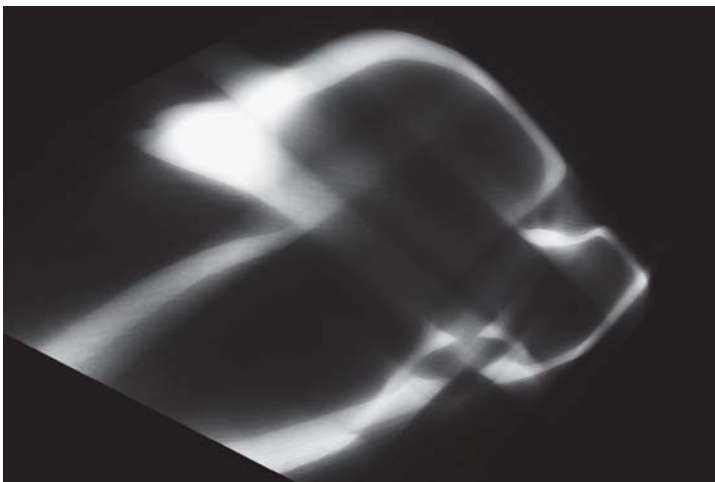


Grundlagen III

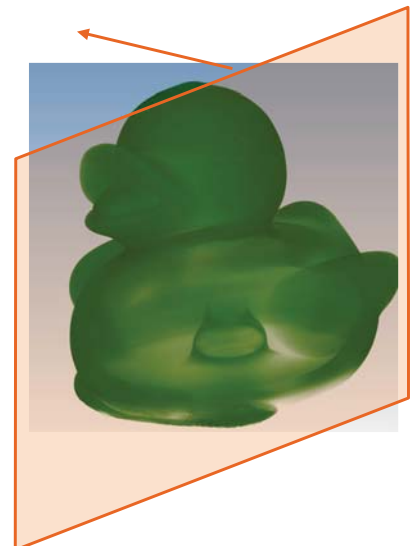
Laminographie

Tomosynthese

- dreidimensionaler Stapel von Schichtbildern
- begrenzte Tiefeninformation



- Schnitte in Tiefenrichtung durch das Objekt sind stark artefaktbehaftet



Robo-CT und Tomosynthese - Laminographische Mikro-CT

- Motivation
- Grundlagen – Laminographie
- Tomosynthese und RoboCT an einer CFK-Landeklappe
- Regularisierung durch Nutzung der Oberflächeninformation
- Zusammenfassung

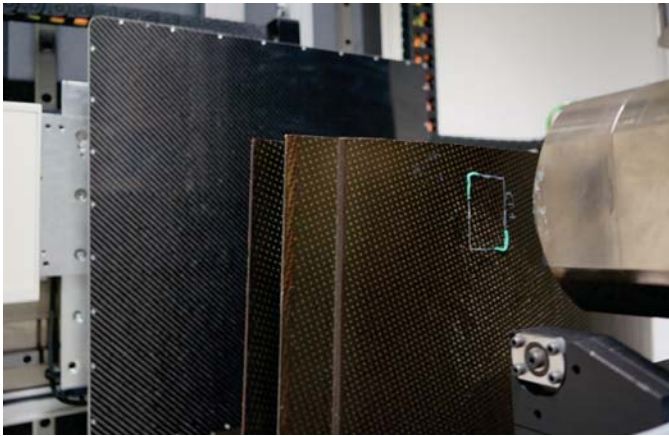
Laminographie und RoboCT an einer CFK-Landeklappe Durchführung der Studie

- a. Aufnahme- und Prüfplanung mittels Simulation (→ XLab)
- b. Referenzmessungen (→ Tomomat)
 - a. Region-of-interest-CT (ROI-CT)
 - b. Laminographie
- c. Umsetzung auf kleiner RoboCT – Laborumgebung (→ FHG-Roboter)
- d. Transfer auf industrielle Roboter (→ FACC-Roboter)
- e. Später: Mobilisierung

Laminographie und RoboCT an einer CFK-Landeklappe

Referenzmessungen (b)

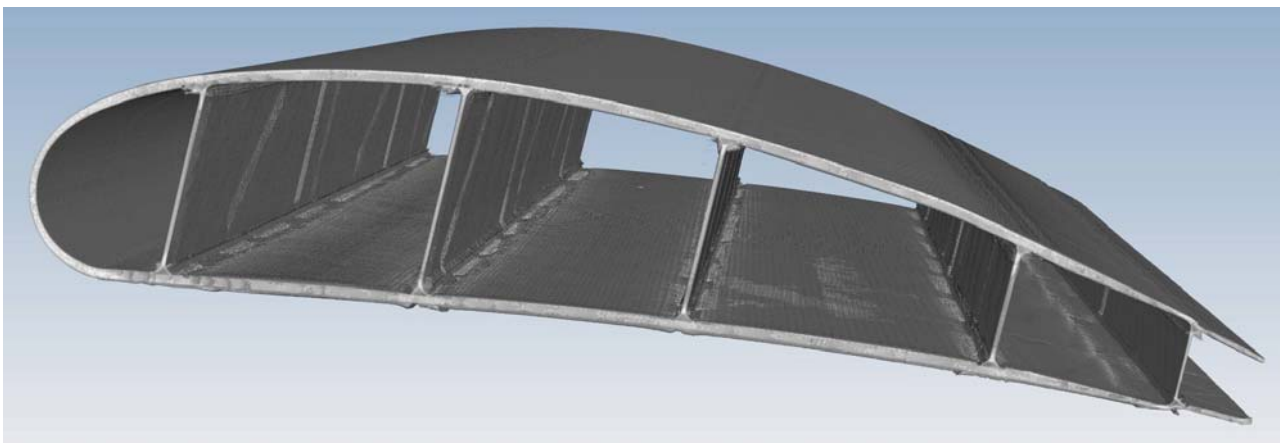
- Landeklappe eines Airbus Flugzeugs
- Vor allem an Stegen im Inneren unangenehme Bedingungen für Ultraschallprüfung



Laminographie und RoboCT an einer CFK-Landeklappe

Übersichts-CT

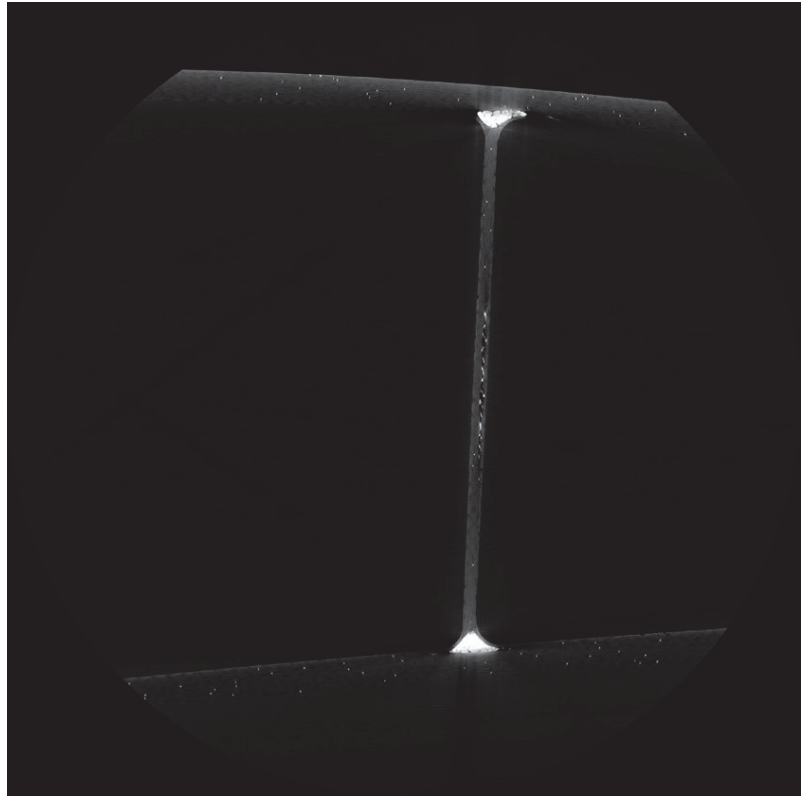
- Vollständige Computertomographie des Messvolumens von 1 m Durchmesser und 1,20 m Höhe durch Messfelderweiterung
- Auflösung bis zu 60 μm
- Zusammensetzen mehrerer Teilmessungen zu einer großen CT



Laminographie und RoboCT an einer CFK-Landeklappe

ROI-CT

- Steg 3
- 40 µm Voxelgröße



Laminographie und RoboCT an einer CFK-Landeklappe

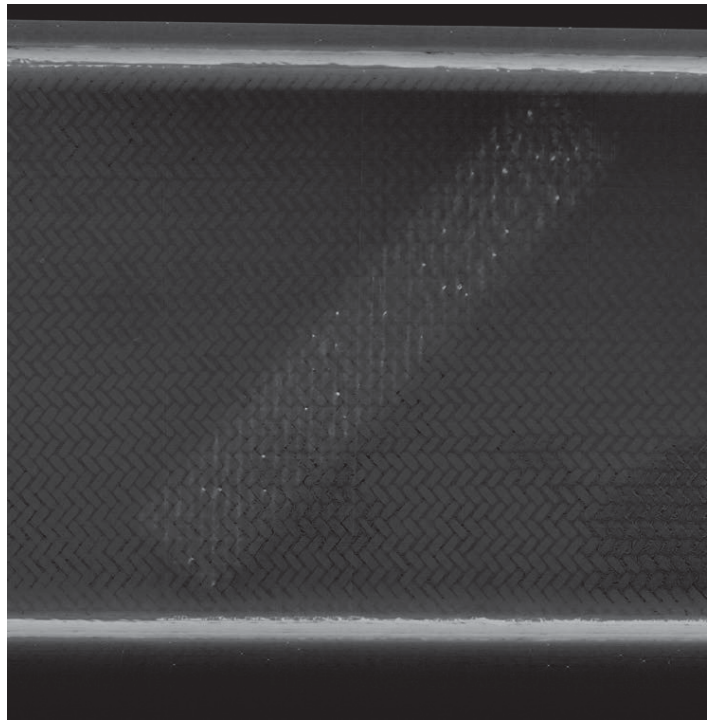
ROI-CT

- Steg 3
- 40 µm Voxelgröße
- Oberflächenverunreinigung
- Harzmangel
Trockene Rovings



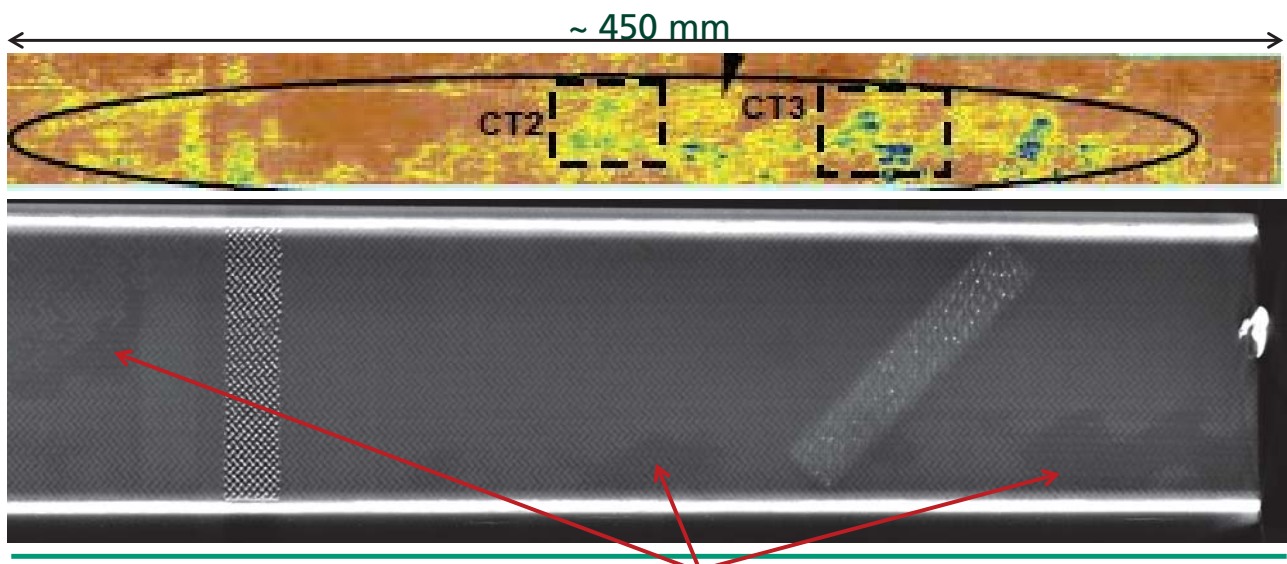
Laminographie und RoboCT an einer CFK-Landeklappe ROI-CT

- Steg 3
- 40 µm Voxelgröße
- Einschluss
- Harzmangel
Porosität



Laminographie und RoboCT an einer CFK-Landeklappe Gegenüberstellung Ultraschall --- ROI-CT

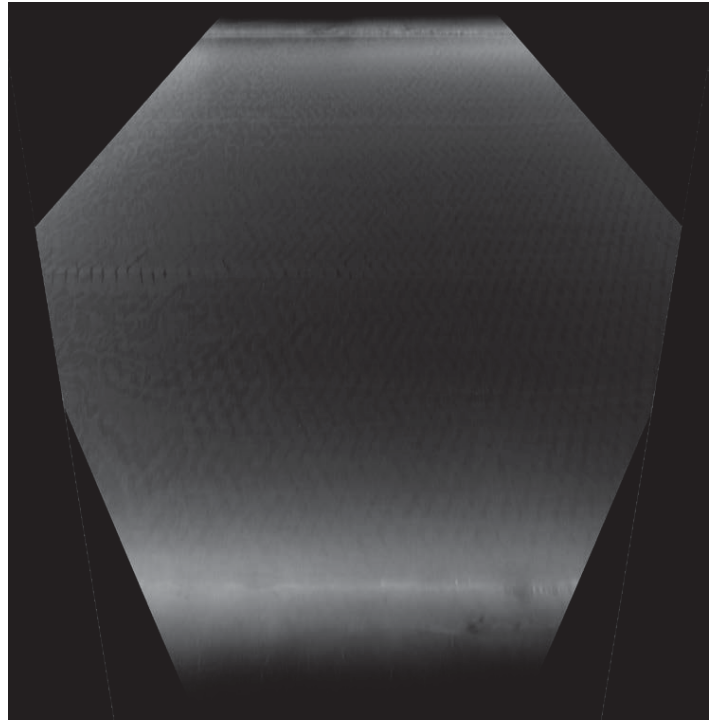
- Steg 3
- Harzmangel



Laminographie und RoboCT an einer CFK-Landeklappe

Zirkuläre Tomosynthese

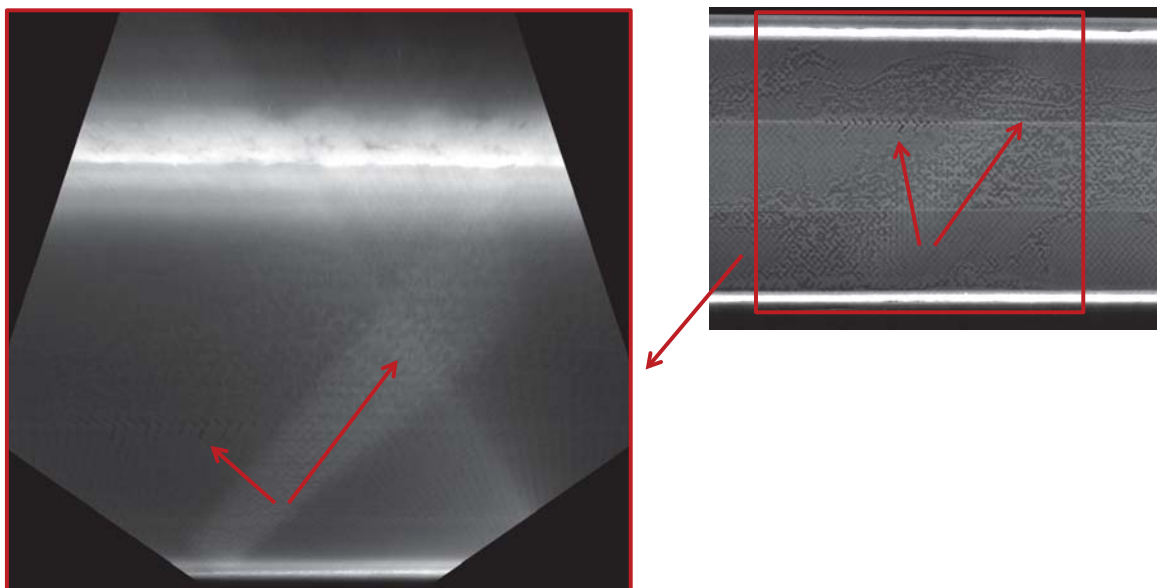
- Steg 3
- Oberflächenverunreinigung
- Harzmangel
Trockene Rovings
- (Perspektivische Verzerrung)
- (Verschmierte Objektränder)



Laminographie und RoboCT an einer CFK-Landeklappe

Gegenüberstellung Tomosynthese --- ROI-CT

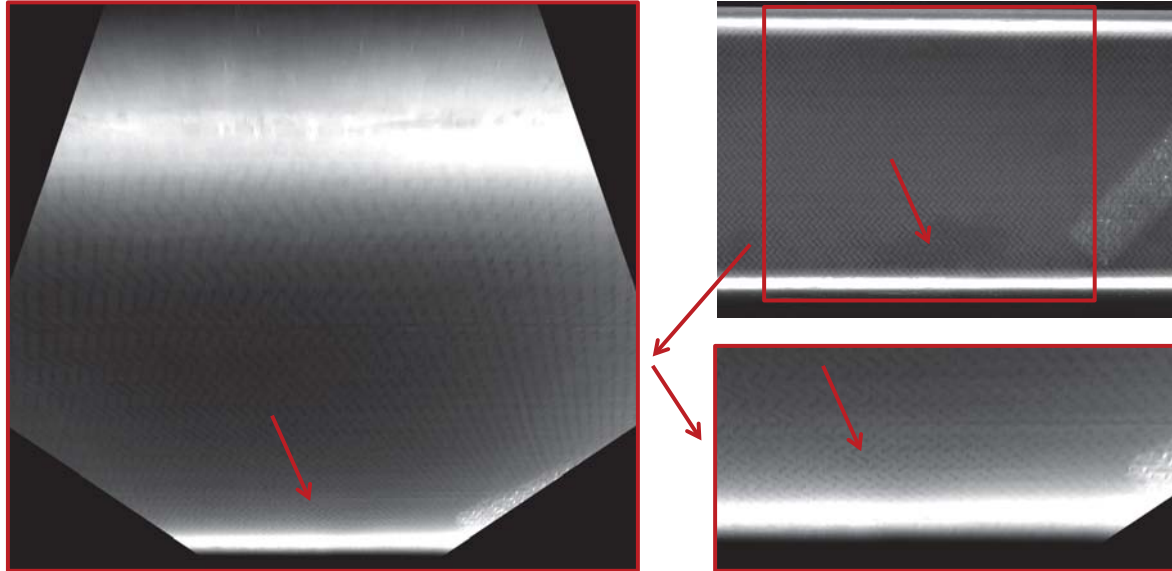
- Steg 3



Laminographie und RoboCT an einer CFK-Landeklappe

Gegenüberstellung Tomosynthese --- ROI-CT

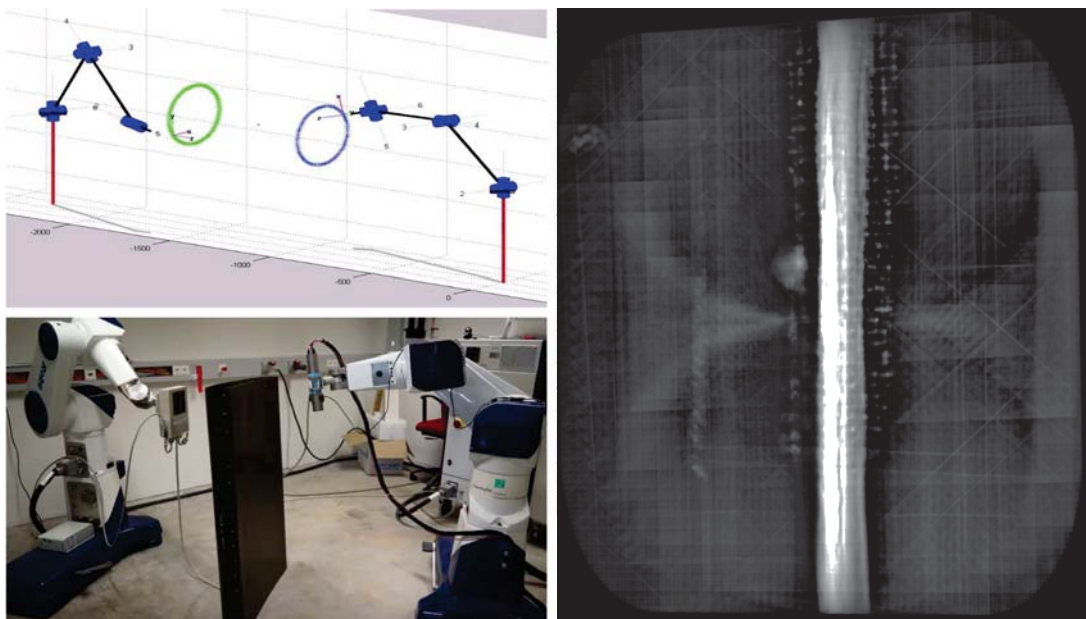
■ Steg 3



Laminographie und RoboCT an einer CFK-Landeklappe

Umsetzung auf RoboCT im Labor (c)

■ Limited angle CT mit ART-Rekonstruktion implementiert



Laminographie und RoboCT an einer CFK-Landeklappe

Umsetzung auf Industrie-Roboter bei FACC (d)

- Testtrajektorien laufen



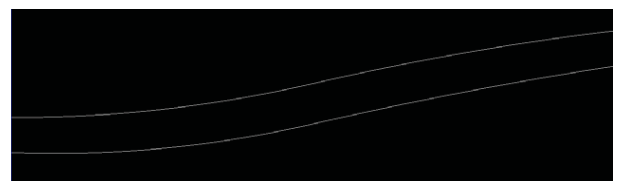
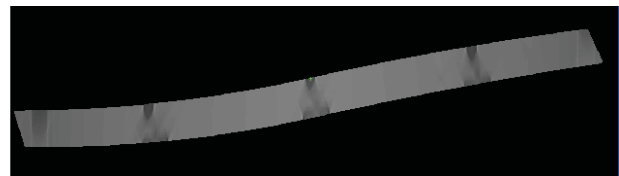
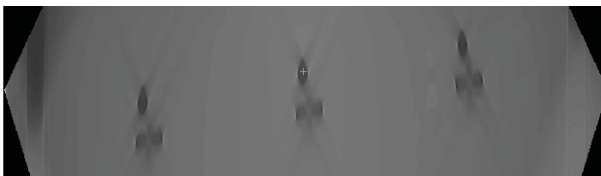
Robo-CT und Tomosynthese - Laminographische Mikro-CT

- Motivation
- Grundlagen – Laminographie
- Tomosynthese und RoboCT an einer CFK-Landeklappe
- Regularisierung durch Nutzung der Oberflächeninformation
- Zusammenfassung

Regularisierung durch Nutzung der Oberflächeninformation

Prinzip

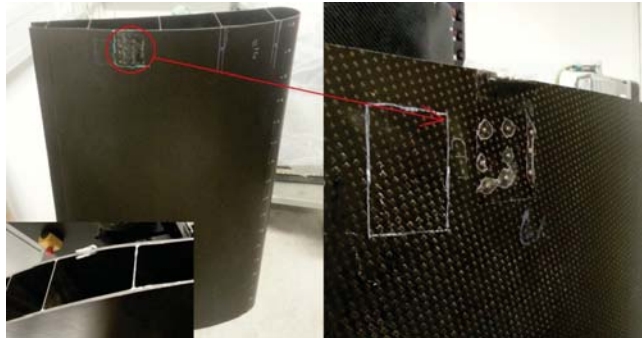
- Nachteil Laminographie:
Objektkonturen parallel zur Aufnahmetrajektorien nicht rekonstruierbar
- Vorgehensweise:
Zusätzliche Hilfsscans mit Markierungen, dann Neuabtastung der
Rekonstruktion
- Beispielhafte Simulation:



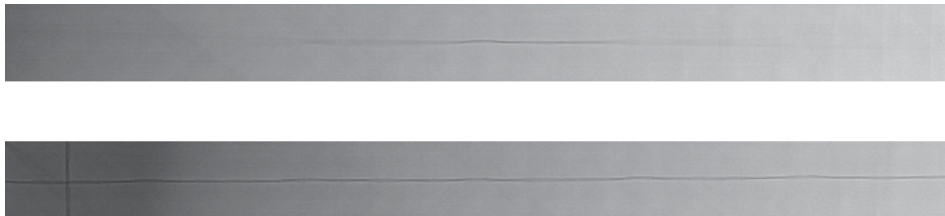
Regularisierung durch Nutzung der Oberflächeninformation

Beispiel an der Landeklappe

- Anbringung der Markierung



- Vergleich Schichtrekonstruktion ohne / mit Regularisierung



Zusammenfassung

Robo-CT und Tomosynthese – Laminographie an FVW

- Studie im Rahmen von QUICOM / WP6 (Large and complex parts)
- Ziel: Umsetzung einer Roboterbasierten Röntgen-CT an einer Landeklappe
- Referenzmessungen auf spezieller Labor-CT-Anlage (abgeschlossen)
 - ROI-CT
 - Zirkuläre Tomosynthese
- Umsetzung auf Labor-Robotern (läuft)
- Übertragung auf Industrie-Roboter (bis Herbst 2015)

Danksagung

QUICOM Projekt

The QUICOM project has received funding from the European Union Seventh Framework Programme (FP7/2007- 2013) under Grant Agreement n°314562



The authors would like to thank Airbus and FACC for providing the specimen and instrumentation for this work

