Qualifikationsunterstützung von Faserverbund-Bauteilen für den industriellen Einsatz mit Hilfe von spezialisierten CT-Verfahren

Christoph SAUERWEIN[*], Sandrine BURDAIRON[*],
Gunnar KNUPE[*], Michael KRUMM[*],
Reinhold OSTER[**], Björn DIEWEL[**],
Manfred SINDEL[***]
[*] RayScan Technologies GmbH, Klingleweg 8, 88709 Meersburg
[**] Eurocopter Deutschland GmbH, Willy-Messerschmitt-Str. 1, 85521 Ottobrunn
[***] Audi AG, NSU-Str. 1, 74172 Neckarsulm

Kurzfassung. Faserverbundwerkstoffe werden seit einigen Jahren in den verschiedensten industriellen Produktionszweigen vermehrt eingesetzt. Neben der Luftfahrtindustrie hat auch die Automobilindustrie die Vorteile der Leichtbauweise erkannt und diese Technologie als Schlüssel für die Zukunft der Fahrzeugproduktion von morgen eingestuft. Faserverbundwerkstoffe sind einerseits leicht und flexibel, andererseits stark belastbar und besonders temperaturstabil und finden in der Kleinserienfertigung zunehmend Anwendung. Damit diesen Leichtbauwerkstoffen der Schritt zum Masseneinsatz ermöglicht werden kann, bedarf es einer Qualifizierung der Herstellungs- und Prüfprozesse, die eine vollständige Materialcharakterisierung und Fehlersuche zerstörungsfrei und mit adäquatem Aufwand erlaubt.
Hierbei kann die Röntgen 3D-CT aufgrund ihrer eindeutigen dreidimensionalen Erfassung des gesamten Bauteilvolumens einen wesentlichen Beitrag leisten. Wegen der Bauteilgeometrie und der werkstoffbedingten Anforderungen an die Volumenbilddarstellung ist es häufig erforderlich, über die verfahrensbedingten Grenzen der herkömmlichen 3D-CT hinauszugehen.
Daher wurden erweiterte CT Verfahren (z.B. Helix-CT, Transversal-CT sowie 3D-CT mit eingeschränktem Winkelbereich) entwickelt, die die 3D- Untersuchung von großen Komponenten ermöglichen. Spezialisierte Rekonstruktions- und Auswertemethoden erlauben die Darstellung und Bewertung von für die Verwendung relevanten Material- und Bauteileigenschaften sowie die Charakterisierung von Fehlern und Schäden.
Im Vortrag werden die Scanmethoden und ihre industriellen Anwendungen anhand zahlreicher Beispiele erläutert. Die Ergebnisse, typische Fehler- und Schadensbilder sowie quantitative und qualitative Auswertungen charakteristischer Materialeigenschaften (z.B. Porositätsbestimmung, Faservolumenanteile) werden vorgestellt.

Lizenz: http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/

Einführung

Faserverbundwerkstoffe sind Materialien, die auf einer mit Fasern verstärkten Polymermatrix basieren. Die am häufigsten verwendeten Fasermaterialien sind Glas und Karbon. Die Polymermatrix besteht üblicherweise aus Epoxy-, Polyester-oder Vinylester-Kunststoffen. Faserverbundwerkstoffe zeichnen sich durch verschiedene vorteilhafte Eigenschaften aus, die sie ideal für Leichtbauanwendungen machen, wie z. B. eine hohe spezifische Steifigkeit und Festigkeit. Durch Variation des Faser- und Matrixmaterials oder der Faserorientierung und -dicke wird die Nutzung von Faserverbundwerkstoffen in unterschiedlichsten Anwendungen ermöglicht. Typische Fehler und Schadensbilder von Faserverbundwerkstoffen sind Delaminationen, Welligkeiten, Porositäten oder Faserrisse. Abbildung 1 zeigt für die genannten Schadensbilder jeweils repräsentative CT-Bilder.

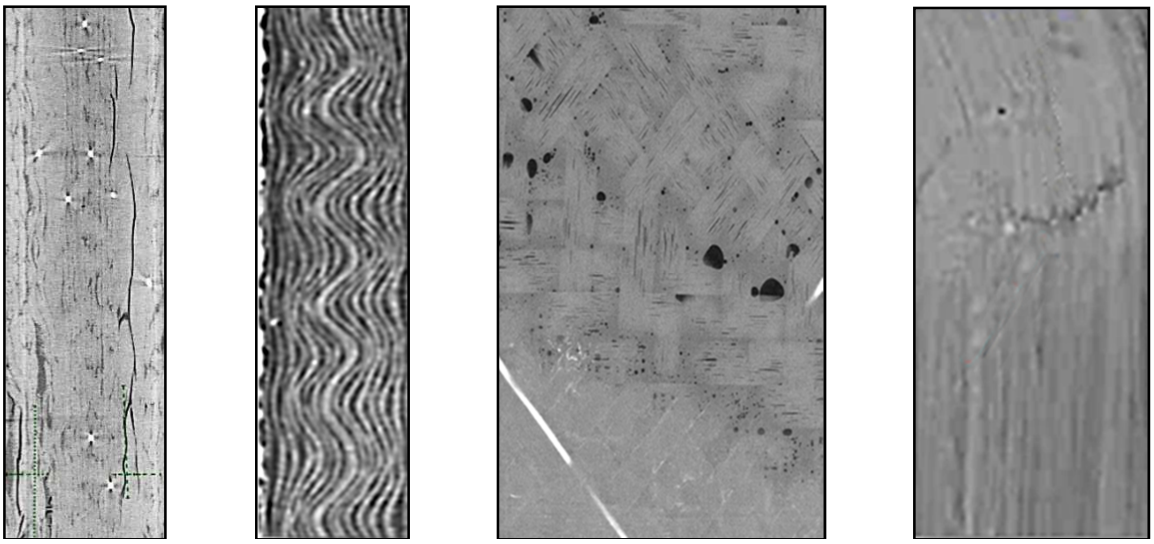


Abbildung 1 Unterschiedliche Defektarten bei Faserverbundwerkstoffen. Von links nach rechts: Delamination, Welligkeit, Porosität and Faserriss.

Testmethoden, die eine komplette Materialcharakterisierung und zerstörungsfreie Fehleranalyse von Faserverbundwerkstoffen ermöglichen, sind immer Teil aktuellen Forschung. Aufgrund der Möglichkeit zur exakten dreidimensionalen Querschnittsbildgebung des gesamten Testobjekts, ist die Röntgen-Computertomographie (CT) die ideale Anwendung für diesen Zweck [7].

Methode

Die Computertomographie ist ein bildgebendes Verfahren, welches auf der materialabhängigen Abschwächung von Röntgenstrahlen basiert und die Darstellung exakter dreidimensionaler Volumenquerschnitte ermöglicht. Vereinfacht gesprochen basiert die CT auf der Annahme, dass der Querschnitt eines Objekts aus einer endlichen Anzahl von gemessenen radiographischen Projektionen des Objekts mit Hilfe eines Computers rekonstruiert werden kann. Bei der einfachsten CT-Messmethode – der 3D-CT bewegen sich Röntgenquelle und –detektor auf einer Kreisbahn um das Objekt bzw. das Objekt rotiert um seine eigene Achse (vgl. Abbildung 2). Nebenbedingung für die 3D-CT ist die vollständige Abbildung und Durchstrahlung des Objekts während der gesamten Messung.

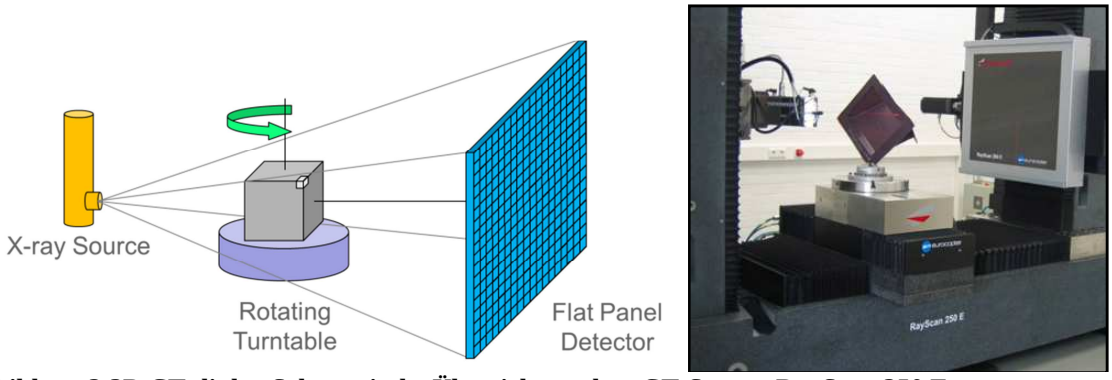


Abbildung 2 3D CT: links: Schematische Übersicht, rechts: CT-System RayScan 250 E.

Die genannten Nebenbedingungen für die Anwendung der 3D-CT schränken den Nutzungsbereich bereits stark ein. Messobjekte aus Faserverbundmaterialien sind in der Regel in mindestens einer Dimension weit ausgedehnt. Des Weiteren nimmt bei der 3D-CT die Bildqualität mit zunehmendem Abstand zur zentralen Querschnittsebene ab, was als Feldkamp-Artefakt bezeichnet wird. Beiden Einschränkungen kann man mit der Helix-CT begegnen, welche die 3D-CT um einen vertikalen Vorschub erweitert, sodass eine Helixbahn um das Messobjekt entsteht [5]. Die Bildqualität ist hierbei im gesamten Messbereich vergleichbar mit jener der zentralen Querschnittsebene bei der 3D-CT und die Objektgröße ist nicht mehr limitiert durch den Messbereich, sondern durch die Größe und Genauigkeit des verwendeten CT-Systems (vgl. Abbildung 3).

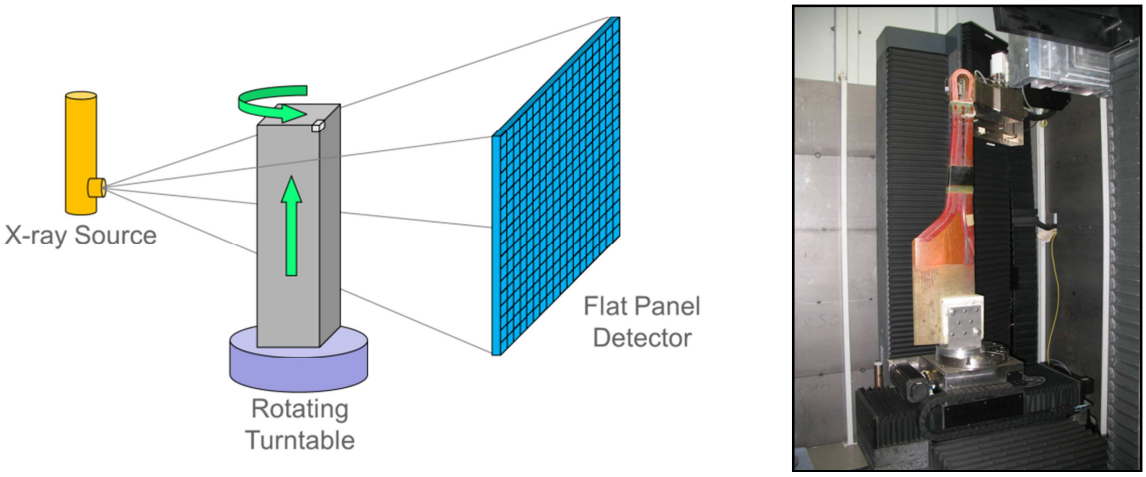


Abbildung 3 Helix-CT: links: Schematische Ansicht, rechts: CT-System RayScan 250 E.

Sofern die Größe des Messobjekts eine Rotation um 360° gestattet, erreicht man mit 3D-CT und Helix-CT sehr gute Ergebnisse. Bei der Messung von planaren Objekten mit großer Ausdehnung in zwei Dimensionen ist dies unter Umständen nicht möglich. Des Weiteren erreicht bei großen planaren Objekten die Absorption der Röntgenstrahlung bei bestimmten Einstrahlwinkeln sehr hohe Werte, wodurch der Nachweis der Röntgenstrahlen auch mit modernster Detektortechnologie nicht gewährleistet werden kann.
Mit Hilfe der Transversal-CT und der dabei verwendeten alternativen Messgeometrie lassen sich diese Einschränkungen überwinden [5]. Hierbei bewegen sich Röntgenquelle und -detektor linear in entgegengesetzter Richtung mehr oder weniger parallel zur Objektoberfläche unter Fokussierung eines ausgesuchten Messbereichs (vgl. Abbildung 4). Abhängig von der gewählten Geometrie hat das rekonstruierte CT-Bild einige wenige scharfe Querschnittsebenen. Mit zunehmendem Abstand zum Fokuspunkt nimmt die Bildschärfe kontinuierlich ab.

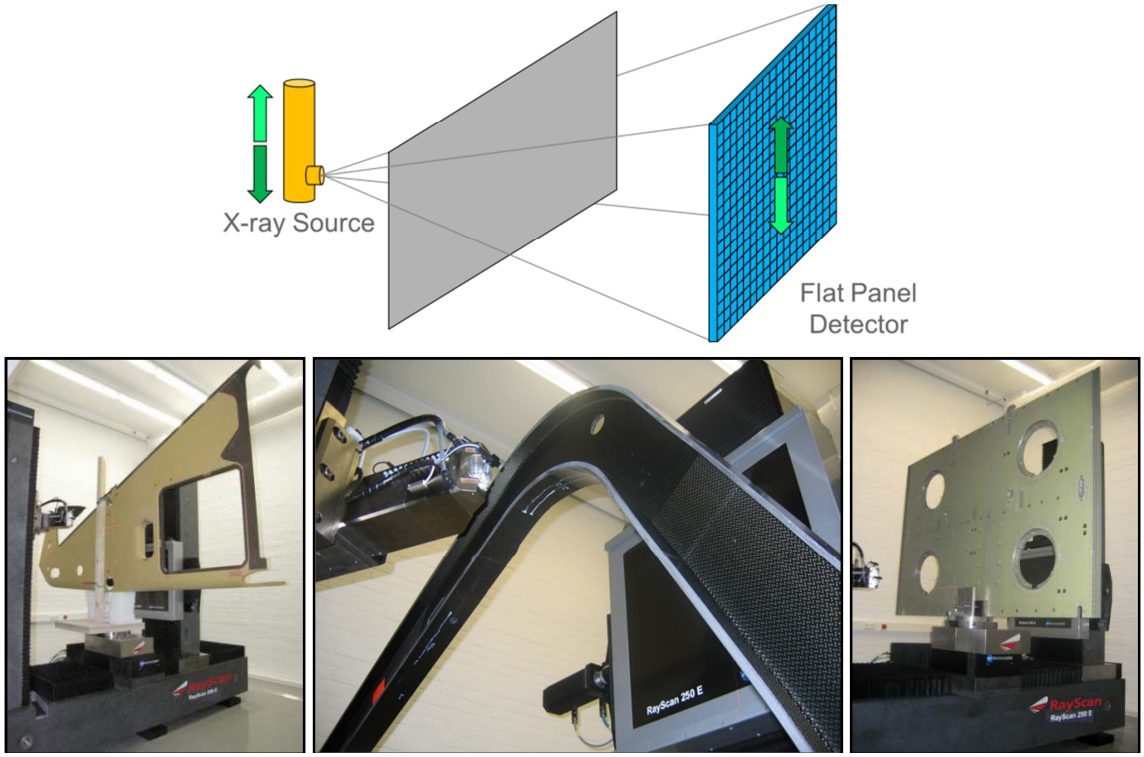


Abbildung 4 Transversal-CT: oben: Schematische Ansicht, unten: CT-System RayScan 250 E bestückt mit verschiedenen Objekten aus Faserverbundmaterialien, links: Seitenverkleidung eines Helikopters, Mitte: Rahmen, rechts: Bodengruppe.

Bauteile oder -gruppen aus Faserverbundmaterialien sind in der Regel ausgedehnt und weisen ein extremes Seitenverhältnis auf, was es oft notwendig macht, die genannten erweiterten CT-Messmethoden zu verwenden.
Sind die CT-Bilder rekonstruiert, ist es notwendig, mit einer anschließenden 3D-Bildverarbeitung relevante Strukturgrößen zu ermitteln. Zur Ermittlung der Porosität, der Faserorientierung oder anderen Materialeigenschaften existieren verschiedenste Ansätze (vgl. bspw. [1], [4], [5]).

Versuchsaufbau und Ergebnisse

Der folgende Abschnitt zeigt Ergebnisse aus verschiedenen Messungen von Baugruppen aus Faserverbundwerkstoffen.
Die erste Messung wurde auf einem RayScan 250 E CT-System (vgl. Abbildung 1) durchgeführt. Dieses System hat eine offene 225 kV Mikrofokus-Röntgenröhre und einen digitalen 16 bit 4 Megapixel Flachbilddetektor auf Basis eines 7-Achsen Manipulationssystems. Verschiedene Proben eines Faserverbundmaterials wurden gemessen, um die Porosität zu bestimmen. In Tabelle 1 sind die bei den Messungen verwendeten Messparameter aufgeführt.

Tabelle 1 Messparameter

Parameter	Wert
Röhrenspannung / kV	200
Röhrenstrom / µA	100
Voxelgröße / µm	17
Anzahl der Projektionen	1890
Rekonstruierte Voxel	2048^3
Messmethode	3D-CT

Aus den nachfolgenden Bildern in Abbildung 5 ist ersichtlich, das die Proben unterschiedliche Porositäten (5 %, 1.3 % und 0 %) aufweisen. Als Messmethode ist die 3D-CT an dieser Stelle ausreichend, da die Proben hinreichend klein gewählt werden konnten und zudem über ein gutes Aspektverhältnis verfügen.

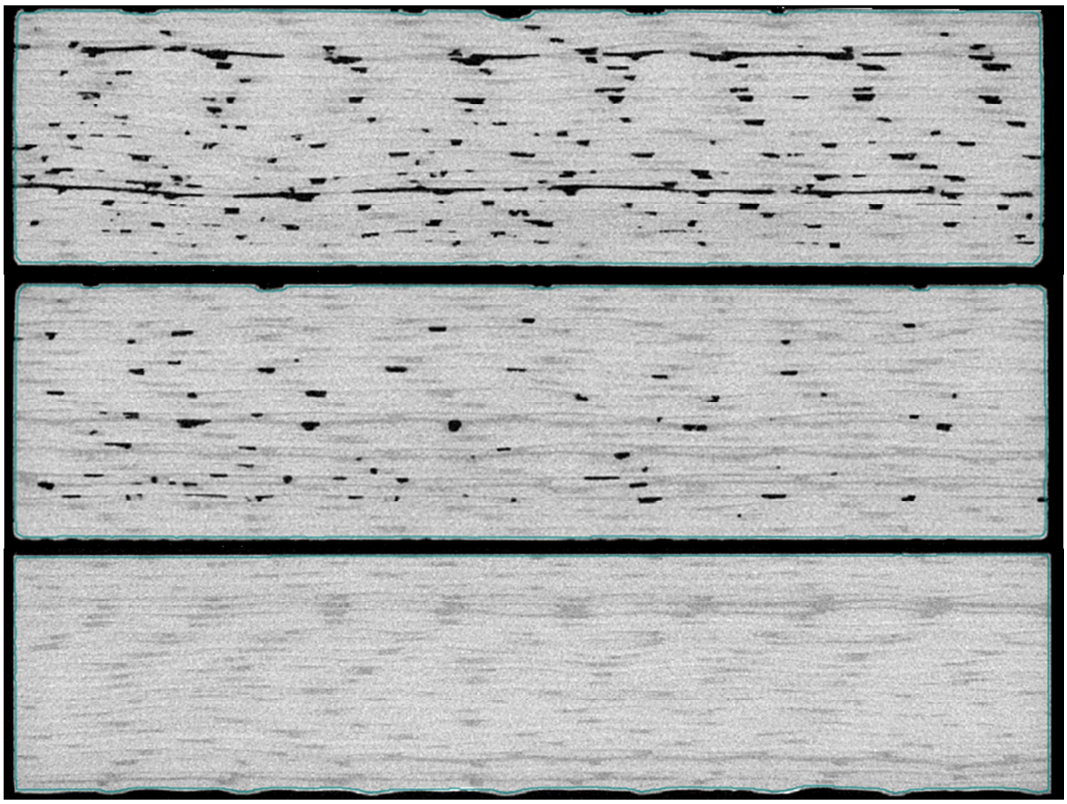


Abbildung 5 Verschiedene Proben von Faserverbundwerkstoffen, die mit 3D-CT gemessen wurden. Als Porositätswerte wurden 5 %, 1,3 % und 0 % bestimmt.

Die folgende Messung wurde auf einem RayScan 200 XE CT-System durchgeführt. Dieses CT-System hat ebenfalls eine offene 225 kV Mikrofokus-Röntgenröhre und einen digitalen 16 bit 4 Megapixel Flachbilddetektor befestigt auf einem 6-Achsen Manipulationssystem mit robotergestützter Vorpositionierung (vgl. Abbildung 6). In diesem Fall bestand die Messaufgabe in der zerstörungsfreien Prüfung einer kompletten aus Faserverbundmaterialien gefertigten Karosserie. Ziel war die Bewertung unterschiedlicher Schadensbilder und die Beurteilung der strukturellen Integrität der belasteten Bereiche.

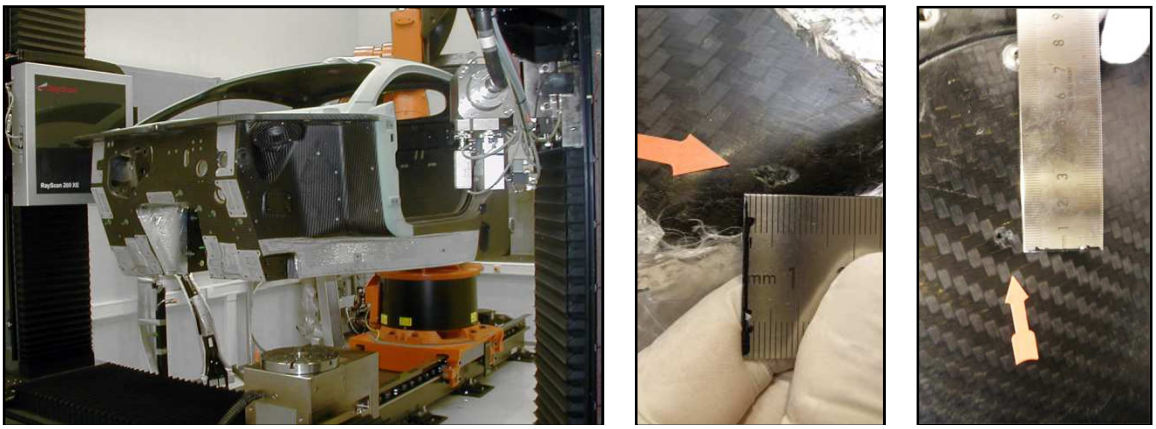


Abbildung 6 Versuchsaufbau zur Messung einer kompletten Karosserie bestehend aus faserverstärkten Verbundwerkstoffen auf einem RayScan 200 XE CT-System. Links: Karosserie platziert im Messfeld, Mitte und rechts: Beschädigungen der Karosserieoberfläche.

Die Messergebnisse der ersten Untersuchung (vgl. Abbildung 6, Mitte) zeigen, dass die strukturelle Integrität der Karosserie an dieser Stelle nicht gefährdet war. Wie in Abbildung 7 dargestellt, kann dem oberflächlichen Schaden keine eindeutige Beschädigung der darunterliegenden Wabenstruktur zugeordnet werden. Die Untersuchung des anderen Schadens (vgl. Abbildung 6, rechts) zeigt ein klares Schadensbild: Die oberen oberflächlichen Schichten aus Faserverbundmaterial wurden kaum beschädigt – die darunterliegenden Schichten weisen jedoch einen klaren Schaden auf. Eine deutliche Deformation der Wabenstruktur ist erkennbar (vgl. Abbildung 8).

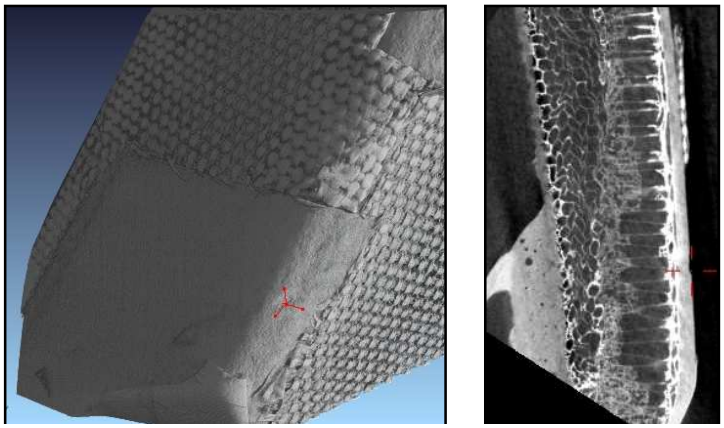


Abbildung 7 Ergebnis der ersten Untersuchung eines Teils einer kompletten aus Faserbundmaterialien gefertigten Karosserie. Links: 3D-Visualisierung der Prüfregion, rechts: Querschnittsbild der Prüfregion.

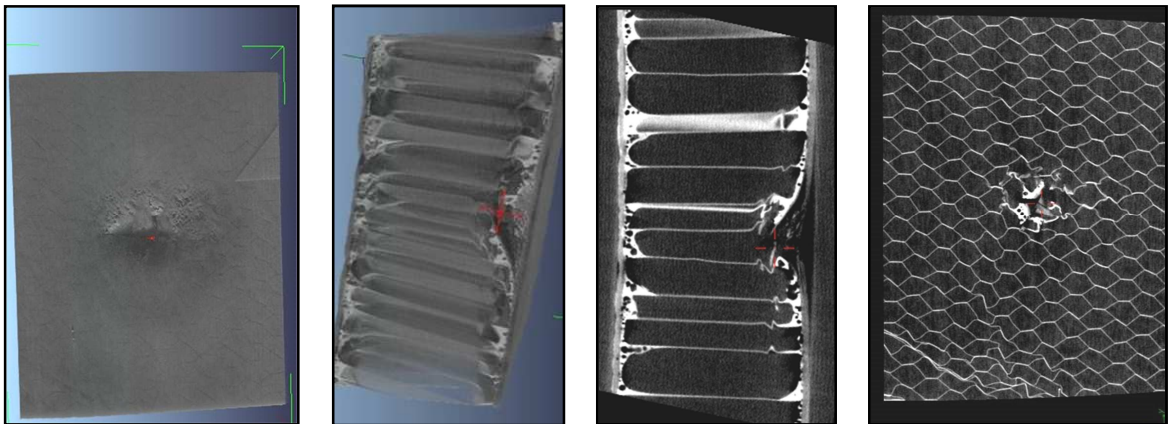


Abbildung 8 Ergebnis der ersten Untersuchung eines Teils einer kompletten aus Faserbundmaterialien gefertigten Karosserie. Links: 3D-Visualisierungen der Prüfregion, rechts: Querschnittsbilder der Prüfregion.

Die folgenden Messergebnisse wurden ebenfalls mit einem RayScan 250 E CT-System erstellt. Die Prüfaufgabe bestand darin, das Prüfteil hinsichtlich Rissbildung und Porosität zu untersuchen. Der Versuchsaufbau und Messparameter sind in Abbildung 9 und Tabelle 2 dargestellt.

Abbildung 9 Verschiedene Ansichten des Versuchsaufbaus zur Prüfung einer Faserverbund-baugruppe mit einem RayScan 250 E CT-System.

Tabelle 2 Messparameter

Parameter	**Wert**
Röhrenspannung / kV	120
Röhrenstrom / µA	230
Voxelgröße / µm	23
Anzahl der Projektionen	1890
Rekonstruierte Voxel	2048^3
Messmethode	3D-ROI-CT

Die Ergebnisse in Abbildung 10 zeigen verschiedene Risse in einer stark beanspruchten Region. Die Rissbildung ist auf den sehr geringen Faservolumenanteil („Harznester“)in diesem Bereich zurückzuführen, wodurch sich die einleitend beschriebenen vorteilhaften Eigenschaften von faserverstärkten Werkstoffen hier nicht wiederfinden lassen.

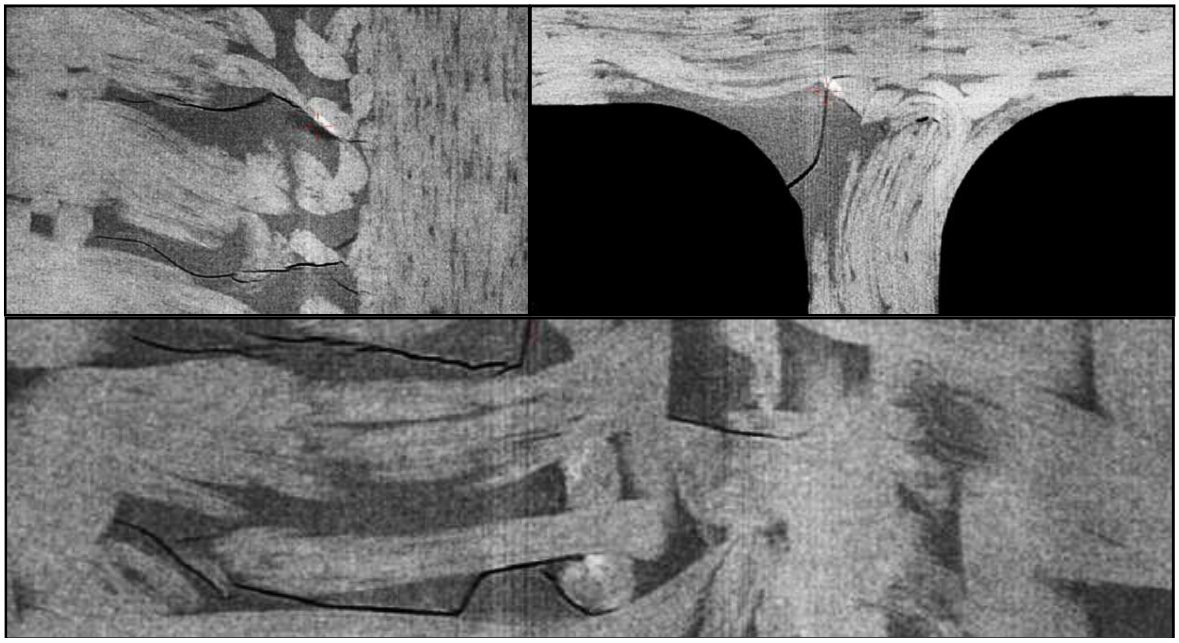
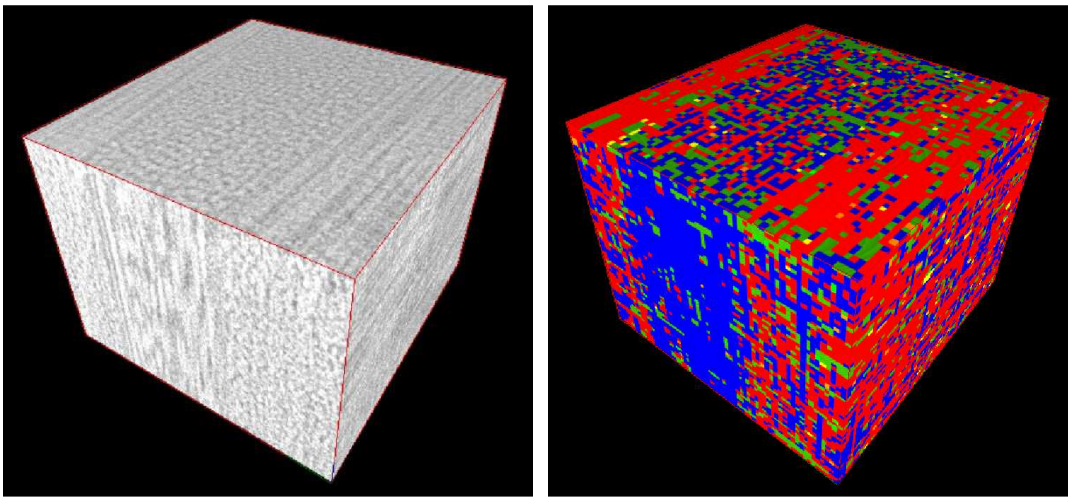


Abbildung 10 Unterschiedliche Querschnittsbilder aus der untersuchten Prüfregion eines Bauteils aus Faserverbundmaterial. Es kann eindeutig eine Rissbildung nachgewiesen werden.

Neben der visuellen Kontrolle der rekonstruierten CT-Bilder ist eine teil- oder vollautomatisierte 3D-Bildverarbeitung zur Extraktion wesentlichen materialcharakterisierender Größen sinnvoll. Ein universell einsetzbares Werkzeug stellt dabei die Texturanalyse dar. Der Begriff „Textur“ bezeichnet dabei eine Struktureigenschaft eines Musters oder Bildbereiches. Typische Texturen sind durch periodisch wiederkehrende Variationen von Grauwerten bzw. Mustern gekennzeichnet. Um die Textur mathematisch zu fassen, werden Grauwertmatrizen verwendet, die die relativen Häufigkeiten des Auftretens zweier Grauwerte in einer festen geometrischen Anordnung speichern und somit angeben, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass ein Pixel mit dem Grauwert x ein Nachbarpixel mit dem Grauwert y besitzt [2]. Mithilfe dieser Matrizen können Texturen unterschieden bzw. ähnliche Texturen erkannt werden. Werden ähnliche Texturen zusammengefasst lassen sich beispielsweise die Faserverläufe in einer Probe extrahieren. Abbildung 11 zeigt farblich codiert den extrahierten Faserverlauf aus einer Probe eines Faserverbundmaterials.



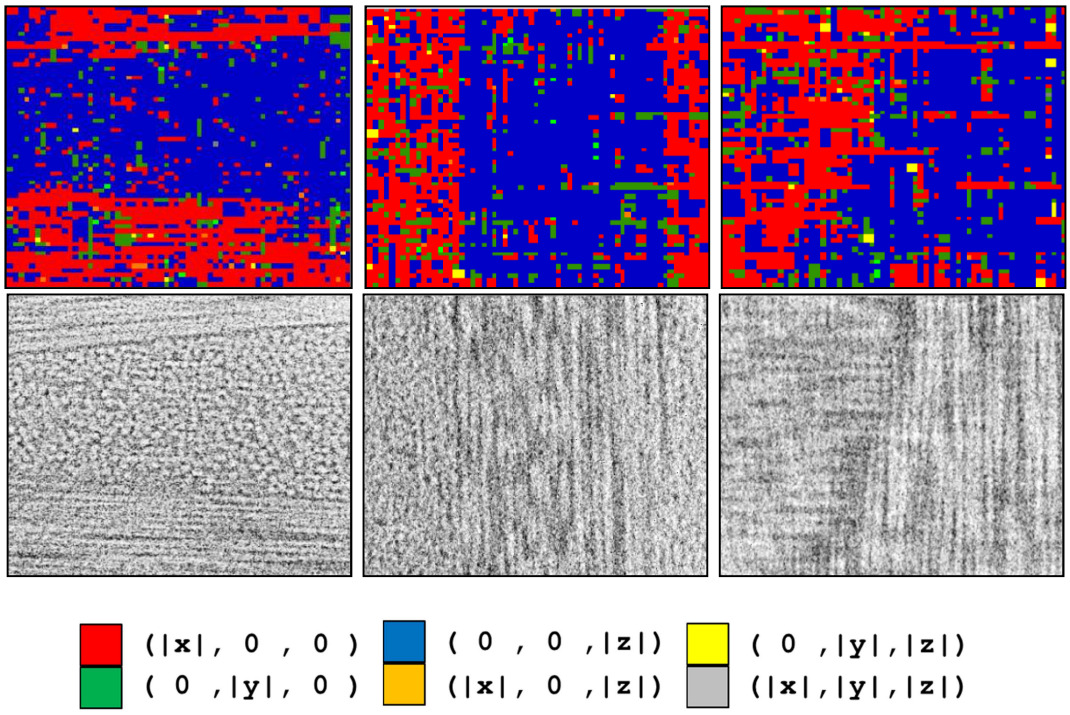


Abbildung 11 Ergebnis einer Bestimmung des Faserverlaufs einer Probe aus Faserverbundmaterial mittels Texturanalyse. Oben 3D-Ansicht, unten: Querschnittsbilder. Die vorwiegende Faserrichtung ist jeweils farblich codiert dargestellt.

Zusammenfassung

Die Messergebnisse der vorgestellten Untersuchungen zeigen typische Fehler und Schadensbilder an Baugruppen aus faserverstärkten Kunststoffen. Obwohl solcherlei Baugruppen in der Regel größer sind als das Messfeld eines CT-Systems und zudem aus Sicht der Materialprüfung mittels CT über ein unvorteilhaftes Seitenverhältnis verfügen, ist es mit spezialisierter CT-Messmethoden möglich, solcherlei Prüfprobleme zu lösen.

Danksagung

Teile dieser Arbeit wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02PK2155 gefördert und in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA entwickelt.

Referenzen

[1] B. Diewel, R. Oster, T. Dierig, T. Günther, “Computed Tomography Image Processing Automated Analysis on GFRP Helicopter Rotor Blades”, International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography, June 20-22 2011, Berlin, Germany

[2] H. Handels: “Medizinische Bildverarbeitung”, Vieweg+Teubner, 2000
[3] R. Oster: “Non-destructive testing methodologies on helicopter fiber composite components challenges today and in the future”, 18th World Conference on Nondestructive Testing, April 16-20 2012, Durban, South Africa.
[4] B. Plank, J. Sekelja, G. Mayr, J. Kastner, „Porositätsbestimmung in der Flugzeugindustrie mittels Röntgen-Computertomografie - Proceedings Industrielle Computertomografie“, Fachtagung 2010, Wels, Österreich, 2010, pp. 25-34
[5] C. Sauerwein, V. Hämmerle, I. Tiseanu, L.R. Williams, F. Caspers: „Mobiles CT-System für die Insitu-Prüfung des LHC am CERN“, DGZfP Jahrestagung, 2010, Erfurt, Germany
[6] T. Schön, I. Bauscher, T. Fuchs, U. Hassler, J. Hiller, S. Kasperl, S. Oeckl, S. Schröpfer, V. Weizel: „Dimensionelles Messen mit Helix-Computertomographie“, Poster 27, DGZfP-Jahrestagung 2009, Münster, Germany.
[7] M. Simon, I. Tiseanu, C. Sauerwein, M. Sindel, M. Brodmann, M. Schmücker: „Advanced Computed Tomography System for the Inspection of Large Aluminum Car Bodies”, European Conference on Non-Destructive Testing, September 25-29, 2006, Berlin, Germany
[8] R. Stössel, D. Kiefel, R. Oster, B. Diewel, L.Llopart Prieto, “µ-Computed Tomography for 3D Porosity Evaluation in Carbon Fibre Reinforced Plastics (CFRP)”, International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography, June 20-22 2011, Berlin, Germany