

Große faserverstärkte Bauteile zerstörungsfrei in Serie prüfen

Region-of-Interest-Computertomografie zur lokalen Analyse der Faserorientierung ohne Probenentnahme

Die lokale Faserorientierung lässt sich in Composite-Materialien mithilfe der Mikrocomputertomografie zerstörungsfrei analysieren. In der Praxis werden größeren Bauteilen jedoch meist kleine Proben entnommen, um Abbildungsfehler zu vermeiden. Die ROI-Methode hingegen ermöglicht es, Bauteile von praktisch relevanter Größe direkt zu analysieren.

Die lokale Faserorientierung beeinflusst die mechanischen Eigenschaften von Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen (FVK) signifikant. Sie kann anhand von 3D-Bilddaten analysiert werden, die die Mikrocomputertomografie (μ CT) liefert. Obwohl diese Methode zerstörungsfrei ist, schneidet man aus größeren Bauteilen meist Proben mit wenigen Millimetern Kantenlänge, um Abbildungsartefakte zu vermeiden. Hier wird gezeigt, dass Abbildungen von Teilregionen aus großen glasfaserverstärkten Trägern, kombiniert mit Orientierungsanalyse der 3D-Textur, es ermöglichen, die μ CT-Methode tatsächlich zerstörungsfrei auf Bauteile von praktisch relevanter Größe anzuwenden.

Mechanisch stark beanspruchte und sicherheitsrelevante Bauteile aus Faser-verbundmaterialien müssen belastbar zerstörungsfrei geprüft werden, da

die mechanischen Eigenschaften kritisch von deren anisotroper Mikrostruktur abhängen und diese produktionsbedingt innerhalb eines Bauteils variiert. In der Regel sind Glas- und Kohlefasern steifer als die umgebende Kunststoffmatrix und wirken daher in Faserrichtung verfestigend. Deshalb sind für das Bauteilverhalten faserverstärkter Kunststoffteile vor allem die lokale Volumendichte und die lokale Orientierung der Verstärkungsfasern entscheidend.

Räumliche Abbildung mit μ CT liefert auch bisher schon diese wertvolle Mikrostrukturinformation. Die Methode erzeugt dreidimensionale Volumenbilder, deren Intensitäten (Grauwerte) im Wesentlichen die Röntgenabsorption der

jeweiligen Materialkomponente widerspiegeln. Glasfasern erscheinen demzufolge in einer Polymermatrix hell. Für Kohlefasern ist der Abbildungscontrast gering. Werden dichtere Matrixpolymere verwendet, ist der Grauwertcontrast invertiert, d.h., die Matrix erscheint hell im Vergleich zu dunklen Kohlefasern.

Für die voxelgenaue Faserorientierungsanalyse wurden bisher räumliche Abtastungen (Voxelkantenlänge Δx) von 1/3 der Faserdicke oder feiner verwendet, bei 10 μ m Faserdicke also $\Delta x \leq 3,5 \mu$ m. Größere Bauteile wurden zerschnitten, in kleine Proben mit Kantenlängen von wenigen Millimetern, um sie im Kegelstrahl des Tomografen mit hoher Auflösung abzubilden. Diese Probleme überwindet eine mit 3D-Texturorientierungsanalyse kombinierte Region-of-Interest-CT (RoI-CT). Quantitative Faserorien-



Der zur Erläuterung der Messmethode verwendete (halbierte) Fronträger aus einem Automobilmotorraum mit vier durch Kreuze markierten Regions of Interest. Der grüne Bereich ist in Bild 1 detaillierter dargestellt (© ITWM)

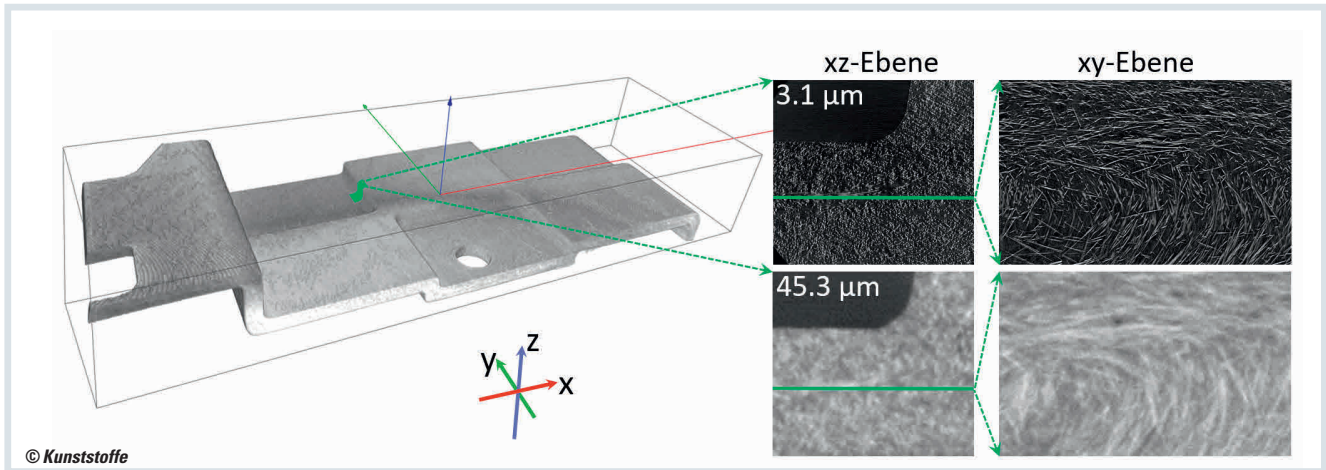


Bild 1. Volumenrendering des im Titelbild grün markierten Bereichs und Schnittbilder aus den 3D-Bildern von Region of Interest A3 mit höchster und geringster Auflösung (© ITWM)

tierungsanalyse auf Basis von RoI-CT-Bildern ist eine zerstörungsfreie, für die Serienprüfung geeignete Qualitätssicherungsmethode.

FVK-Bauteil aus einem Kfz-Motorraum

Die Methodik wird anhand eines Fronträgers aus einem Automobilmotorraum erläutert. Der Träger aus spritzgegossenem, glasfaserverstärktem Polypropylen (PP-LGF30) ist ca. 90 cm lang und 35 cm breit, dient der Aufnahme des Haubenschlosses, der Haubenpuffer, der Kühler sowie der Frontscheinwerfer und trägt zum Aufprallschutz bei. 30 % des Gewichts entfallen auf Glas-Langfasern mit 10–20 µm Dicke und 10–15 mm Länge (vor der Verarbeitung). Die Wandstärke der Struktur beträgt ca. 2 mm. Basierend auf Fließsimulationen des Herstellungsprozesses wurden Regionen für die 3D-Abbildung mit RoI-CT und Faserorientierungsanalyse ausgewählt (**Bild 1**).

Bei geeigneter Konfiguration eines µCT-Scanners (langer Quell-Detektor-Abstand) können auch kleine Probenausschnitte aus größeren Bauteilen mit feiner räumlicher Abtastung gemessen werden, ohne dass die Bereiche aus dem Bauteil ausgeschnitten werden müssten. Der µCT-Scanner MetRIC des Fraunhofer EZRT ist speziell für eine solche RoI-CT ausgelegt. Er verfügt über eine Mikrofokus-Transmissionsröhre und einen Röntgen-Flächendetektor. Der Aufbau des Scanners erlaubt das hochpräzise Positionieren von Probe und Messregionen (Regions of Interest) innerhalb der Probe. Der außergewöhnlich große Fokus-Detektor-Abstand (bis zu 3,3 m) sowie 10 motorisierte Freiheitsgrade ermöglichen Voxelkantenlängen bis zu 3 µm, auch in mehreren Zentimeter dicken Bauteilen. Artefakte, die in der Volumenbild-Rekonstruktion durch die RoI-Geometrie entstehen können, werden durch kontinuierliche

Probendrehung sowie durch Fensterfunktionen beim Filtern der Projektionsbilder vermieden.

Lokale Faserorientierungsanalyse

Das berechnete CT-Bild repräsentiert die gesamte Messregion als Menge von Voxeln. Jedes Voxel entspricht einem würfelförmigen Volumenelement in der Region of Interest. Einzelne Fasern können im rekonstruierten CT-Bild demnach nur bei geringen Faservolumengehalten und mit sehr hoher Ortsauflösung als einzelne Bildobjekte identifiziert werden. Die Faserkomponente lässt sich im Fall von Glasfasern gut von der Matrix unterscheiden. Für dieses Material wurden in den letzten zehn Jahren Bildverarbeitungs-Algorithmen entwickelt, die aus den Grauwerten der einzelnen Voxel der Faserkomponente eine Vorzugsrichtung im Raum berechnen (die Richtung der »

Die Autoren

Dr.-Ing. Thomas Baranowski betreut am Ford Research and Innovation Center Aachen die Forschungsaktivitäten im Bereich der Prozess- und Crashesimulation für Faserverbundbauteile im Team „Chassis Materials & CAE“.

Dascha Dobrovolskij ist Mathematikerin, promoviert in Materialwissenschaften und arbeitet derzeit in einem Projekt im Bereich 3D-Analyse mikroskopischer Bilddaten

Dr. Kilian Dremel hat am Lehrstuhl für Röntgenmikroskopie der JMU Würzburg promoviert, seitdem arbeitet er für die Gruppe NanoCT Systeme des Fraunhofer-Entwicklungszentrums Röntgentechnik EZRT in Würzburg.

Dr. Astrid Hölzing ist seit 2014 in der Gruppe NanoCT Systeme des Fraunhofer EZRT verantwortlich für das Anwendungsfeld Faserverbundwerkstoffe.

Dr.-Ing. Günter W. Lohfink ist seit 2014 Leiter Entwicklung Produkte bei der Montoplast GmbH in Morsbach.

Dr. Katja Schladitz ist seit 1999 am Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM in Kaiserslautern in der Abteilung Bildverarbeitung im Bereich 3D-Bildanalyse tätig; katja.schladitz@itwm.fraunhofer.de

Dr. habil. Simon Zabler leitet seit 2011 die Gruppe NanoCT-Systeme des Fraunhofer EZRT.

Service

Literatur & Digitalversion

- Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/2020-03

English Version

- Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at www.kunststoffe-international.com

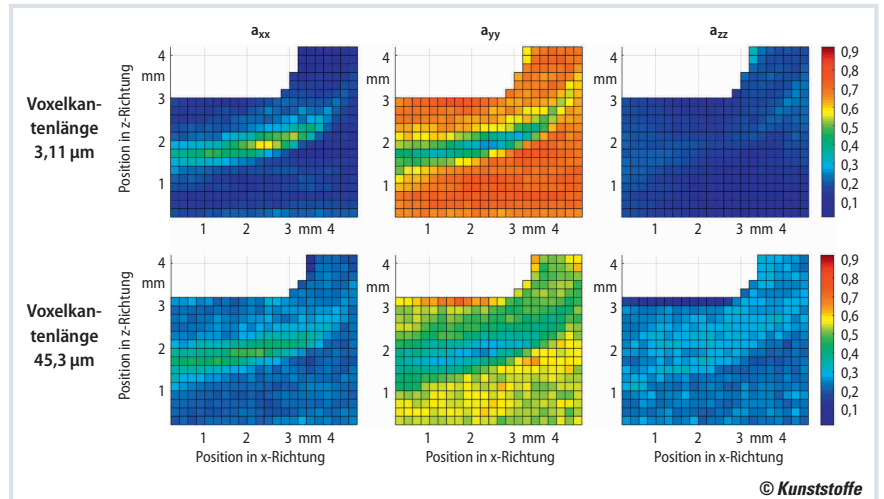


Bild 2. Gemessene Diagonalkomponenten des Orientierungstensors aus den CT-Bildern 2. Ordnung. Gezeigt sind Schnitte durch die 3D-Bilder in xz-Richtung im Koordinatensystem aus Bild 2 (y: Spritz-, z: Dickenrichtung) (© ITWM)

Faserachse). Für eine ausführliche Beschreibung der voxelgenauen Methoden und einen Vergleich siehe [1], für einen Überblick über die verschiedenen Algorithmenklassen für globale, lokal gemittelte oder voxelgenaue Faserorientierungsanalyse [2].

Hier wird die Hesse-Matrix der 2. partiellen Ableitungen der Voxelgrauwerte in nächster Nachbarschaft eines Bildpunktes genutzt: Der Algorithmus findet als lokale Faserrichtung jene, in der das „Grauwertgebirge“ am wenigsten gekrümmt ist, also den Eigenvektor zum kleinsten Eigenwert der Hesse-Matrix. Nicht-informative Werte aus Matrixvoxeln werden ausgeblendet. Anschließend wird der Orientierungstensor 2. Ordnung abgeleitet. Für diese Analyse war es bisher notwendig, dass der Faserdurchmesser von 10–20 µm mit mindestens drei Voxeln aufgelöst wird. Tatsächlich verschieben sich die Messergebnisse bei größerer Auflösung leicht in Richtung Isotropie; dennoch konnte für den hier untersuchten Träger selbst bei Voxelkantenlängen von 45 µm, also weit größer als die Faserdicke, der Orientierungstensor noch sehr genau bestimmt werden (Tabelle). Bild 1 und Bild 2 zeigen Rol-Aufnahmen und Analyseergebnisse.

Vergleich mit Fließsimulation

Anhand der 3D-Bilder (hier wurde Rol-CT mit hoher Auflösung angewandt) kann die tatsächliche lokale Mikrostruktur mit jener verglichen werden, die durch Simu-

lation des Fließverhaltens im ganzen Bauteil vorhergesagt wird. Für drei Teilregionen wurden die mit Moldflow berechneten Orientierungstensen 2. Ordnung mit den aus der Rol-CT bestimmten Tensorkomponenten verglichen. Der gesamte Träger hat im Dual Domain Mesh 170000 Elemente mit einer Kantenlänge von ca. 2 mm. Dieses 2,5D-Netz verfügt nur über Oberflächeninformationen, während ein 3D-Netz über die gesamte Teiledicke hinweg Informationen bzw. Daten enthält. Für die Simulation wurde das Rotational-Diffusion-Modell mit Default-Einstellungen verwendet. Die CT-Daten wurden in vergleichbar große, aber würfelförmige Regionen unterteilt.

Bild 3 zeigt die Diagonalelemente der simulierten und der bildanalytisch bestimmten Orientierungstensen. Die Komponenten in Plattenebene stimmen qualitativ sehr gut überein, quantitativ zeigt die Bildanalyse eine stärkere Anisotropie als von der Simulation vorhergesagt. Die stärkste Abweichung ist für die Komponente senkrecht zur Dickenrichtung zu beobachten mit auffälligen Spitzen in den simulierten Werten für die zentrale Schicht. Diese Auffälligkeiten tauchen in der Rol-CT Messung nicht auf.

Fazit

Anhand eines Standardbauteils aus dem Automobilbau wurde gezeigt, dass Rol-CT für große FVK-Bauteile 3D-Bilddaten in ausreichender Qualität für eine detaillierte lokale Faserorientierungsanalyse gene-

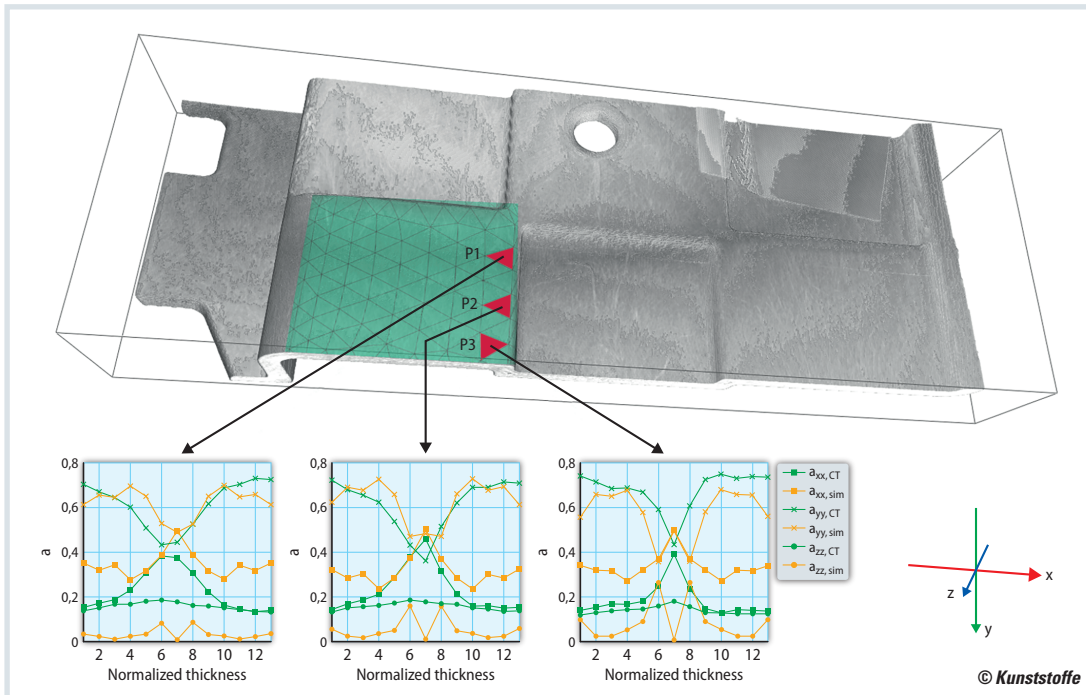


Bild 3. Diagonalenkomponenten des Orientierungstensors 2. Ordnung, Vergleich der durch Spritzgießsimulation vorhergesagten (orange) und der in den 3D-Bildern mit höchster Auflösung gemessenen (grün) Orientierung. Die Position der in der Simulation verwendeten Regionen ist im Volumenrendering rot markiert

(© ITWM)

© Kunststoffe

rieren kann. Voraussetzung dafür ist, dass sich die Probe im Tomografen mit ausreichend vielen Freiheitsgraden und weiten Verfahrenswegen positionieren lässt.

Es wurde ebenfalls gezeigt, dass selbst bei Voxelgrößen weit über dem Faserdurchmesser lokale Orientierungen (zumindest qualitativ) analysiert werden können. Die Ergebnisse für Voxelkantenlängen zwischen 45 µm und 3 µm sind konsistent, die Fließrichtung wurde stets als Hauptfaserrichtung identifiziert, aber auch die typische Fehlorientierung der Zentralschicht wurde bei jeder der unter-

suchten Auflösungen gefunden. Bei größeren Auflösungen wird die lokale Strukturinformation jedoch verschmiert, was die Orientierungsanalyseergebnisse Richtung Isotropie verzerrt. Vergleiche der Ergebnisse für Voxelkantenlängen 45 µm, 21 µm und 10 µm zeigen aber auch, dass nicht die Voxelkantenlänge allein darüber entscheidet, wie gut die Orientierung anhand eines 3D-Bilds gemessen werden kann. Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (räumlich interpretiert, siehe [3]) spielt ebenso eine Rolle wie die Beschaffenheit des Materials.

Der Vergleich mit der Fließsimulation zeigt qualitativ gute Übereinstimmung, vor allem für die dominierende Tensorkomponente in Fließrichtung. Eine Bildanalyse an CT-Bildern ist demzufolge sehr gut geeignet, um zeitlich-räumliche Simulationen von Spritzgießprozessen zu validieren. Damit hat Rol-CT das Potenzial, zum Standardwerkzeug für die lokale Faserorientierungsanalyse für GFK-Bauteile zu werden.

Vergleichbare Untersuchungen an CFK-Proben sind ebenfalls vielversprechend. ■

Region of Interest	Größe in Plattenebene [cm x cm]	Voxelkantenlänge [µm]	Anisotropieindex	Diagonalkomponenten des Orientierungstensors 2. Ordnung		
				xx	y	zz
A3c	4,9x2,5	45	0,61	0,23	0,54	0,21
A3m	2,0x1,4	21	0,60	0,22	0,54	0,22
A3h	1,0x0,7	10	0,65	0,21	0,58	0,21
A3uh	0,6x2,3	3	0,78	0,18	0,66	0,17
A3uh.1	0,6x0,4	3	0,75	0,18	0,63	0,18
A3uh.2	0,6x0,4	3	0,78	0,16	0,67	0,16
A3uh.3	0,6x0,4	3	0,76	0,18	0,64	0,16
A3uh.4	0,6x0,4	3	0,78	0,17	0,65	0,16
A3uh.5	0,6x0,4	3	0,77	0,18	0,63	0,17
A3uh.6	0,6x0,4	3	0,77	0,19	0,63	0,17

Tabelle. Diagonalkomponenten des Orientierungstensors 2. Ordnung, gemessen in 3D-Bildern der Region of Interest mit verschiedenen Auflösungen

(Quelle: ITWM)