

Charakterisierung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen mittels Röntgencomputertomographie als Grundlage für die Entwicklung von Ultraschallprüfverfahren

Christian FARTELY^{1,2}, Silvia SCHUHMACHER², Rainer MEIER¹, Georgeta RADU²,
Ralf LÖFFLER², Timo BERNTHALER²

¹intelligeNDT Systems & Services GmbH, Paul-Gossen-Str. 100, 91052 Erlangen,
Christian.Fartely@intelligentdt.de

²Hochschule für Technik und Wirtschaft Aalen, Beethovenstr.1, 73430 Aalen,
Silvia.Schuhmacher@htw-aalen.de

Kurzfassung. Stetig steigende Anforderungen an die Energieeffizienz sind der Grund für den unaufhaltsamen Vormarsch der Faserverbundkunststoffe, wobei insbesondere der Einsatz kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe (CFK) ansteigt. Zur Qualitätskontrolle von CFK-Bauteilen in der Fertigung wird hauptsächlich die Ultraschallprüfung eingesetzt. Umfangreiche Prüferfahrungen belegen, dass sie sich zur Detektion von Delaminationen, Materialeinschlüssen und Porositäten eignet.

Die Ultraschallsignale werden dabei sowohl vom Schichtaufbau des Laminats als auch von der Verteilung von Einschlüssen und Porositäten innerhalb der Schichten bzw. des Materials beeinflusst. Zur Verfeinerung der Ultraschall-Prüfaussage sind detaillierte Kenntnisse bezüglich dieser Kenngrößen erforderlich. Als Untersuchungs- bzw. Referenzmethode bietet sich hierzu die Röntgencomputertomographie (CT) an.

Im vorliegenden Beitrag werden die Möglichkeiten zur Charakterisierung von Porositäten in CFK mittels Mikrofokus-CT für Proben gezeigt, deren Abmessungen groß genug sind (im Zentimeterbereich liegen), um eine gleichzeitige Ultraschallprüfung zu ermöglichen. Zusätzlich wird für Probendimensionen im Millimeterbereich der durch die Nanofokus-CT ermittelte mikrostrukturelle Aufbau, beispielsweise Faserorientierung und Schichtstruktur, dargestellt.

Die gewonnenen Volumen-Informationen aus den CFK-Proben sollen in einem nächsten Schritt als Basis für die Modellierung der Wechselwirkung des Ultraschalls mit der Schichtstruktur und der Porosität dienen und in der Entwicklung von Ultraschallprüfverfahren zur quantitativen Porositätsbestimmung in CFK-Bauteilen münden.



Charakterisierung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen mittels Röntgencomputertomographie als Grundlage für die Entwicklung von Ultraschallprüfverfahren

Christian Fartely^{1,2}, Silvia Schuhmacher², Rainer Meier¹, Georgeta Radu², Ralf Löffler², Timo Bernthaler²

¹intelligeNDT Systems & Services GmbH, Paul – Gossen – Straße 100, 91052 Erlangen

² Hochschule Aalen – Technik und Wirtschaft, Studiengang Oberflächen- und Werkstofftechnik, Beethovenstraße 1, 73430 Aalen

I) Einführung

Stetig steigende Anforderungen an die Energieeffizienz sind der Grund für den unaufhaltsamen Vormarsch der Faserverbundkunststoffe, wobei insbesondere der Einsatz kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe (CFK) ansteigt. Zur Qualitätskontrolle von CFK-Bauteilen in der Fertigung wird hauptsächlich die Ultraschallprüfung eingesetzt. Umfangreiche Prüferfahrungen belegen, dass sie sich zur Detektion von Delaminationen, Materialeinschlüssen und Porositäten eignet.

Die Ultraschallsignale werden dabei sowohl vom Schichtaufbau des Laminats als auch von der Verteilung von Einschlüssen und Porositäten innerhalb der Schichten bzw. des Materials beeinflusst. Zur Verfeinerung der Ultraschall-Prüfaussage sind detaillierte Kenntnisse bezüglich dieser Kenngrößen erforderlich. Als Untersuchungs- bzw. Referenzmethode bietet sich hierzu die Röntgencomputertomographie (CT) an.

Die CT-Untersuchungen wurden an zwei verschiedenen CFK-Typen durchgeführt. Hinsichtlich Porosität wurden die Proben mit einer Mikrofokus-Röntgenröhre untersucht, wobei die Probendimensionen so gewählt wurden, dass eine Ultraschallprüfung derselben Proben möglich ist. Bezüglich des mikrostrukturellen Aufbaus wurde eine hochauflösende Nanofokus-Röntgenröhre verwendet.

II) Experimentelles Setup

II a) Hardware und Software

→ Röntgencomputertomograph *phoenix|x-ray*® *v|tome|x s* mit zwei Röntgenröhren
→ 3D-Analys-Software *Volume Graphics*® *VG StudioMAX 2.0*



Abb. 1 : Röntgencomputertomograph der Hochschule Aalen (rechts) mit Rekonstruktionseinheit (links)

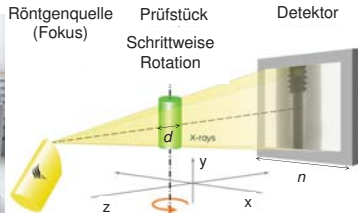


Abb. 2 : Prinzipieller Aufbau eines CT-Systems nach dem Prinzip der Kegelstrahltomographie.

II b) Proben

Die Proben wurden vor den CT-Messungen mittels Ultraschall untersucht. Hierbei wurden beim CFK mit bidirektionaler Faserorientierung (im Folgenden *BD-CFK* genannt) Bereiche detektiert, die eine Abschwächung des Rückwandechos um -6, -12 und -18 dB aufgewiesen haben, dargestellt in Abb. 3). Beim CFK mit multidirektionaler Faserorientierung (*MD-CFK*), dargestellt in Abb. 4) traten sogar Bereiche auf, in denen das Signal der Rückwand nicht mehr zu detektieren war.

Probe	Faserorientierung	Schichtdicke Rovings / Fasern [µm]	Schichtdicke Matrix [µm]	Faserdurchmesser [µm]
BD-CFK	bidirektional	150...170 *	-	8,0 *
MD-CFK	multidirektional	200...250 *	30...50 *	5,1...5,7 *

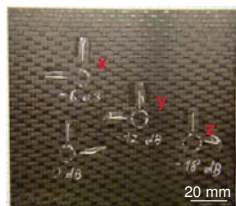


Abb. 3: BD-CFK mit Angaben zu lokal gemessenen Schallschwächungen des Rückwandechos ($x = -6\text{dB}$, $y = -12\text{dB}$, $z = -18\text{dB}$).

* Sämtliche Werte aus den CT- Messungen wurden durch Untersuchungen an materialographischen Schliften bestätigt. Hierbei kam ein *Carl Zeiss*® *Axioplan 2* und die Software *Axiovision 4.7* desselben Herstellers zum Einsatz.

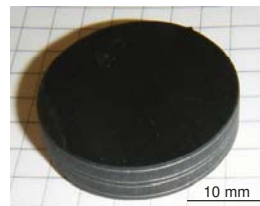


Abb. 4: MD-CFK (partiell war hier kein Rückwandecho zu detektieren).

III) Mikrofokus-CT: Darstellung der Porosität

III a) BD-CFK

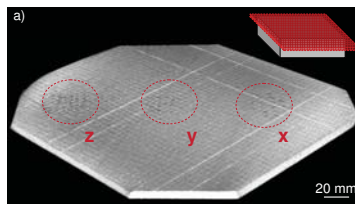
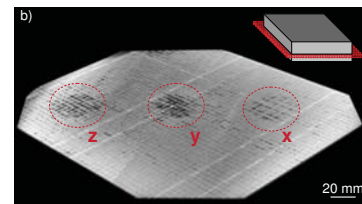


Abb. 5: CT-Aufnahme, 3D-Ansicht: a) Gesamtaufnahme



b) Schnitt ca. 4,8 mm unter Oberfläche. In den Bereichen x, y und z wurden drei Porencluster (siehe Abb. 3) nachgewiesen.

III b) MD-CFK

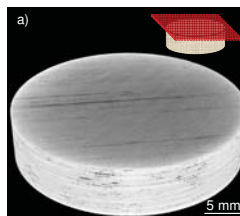
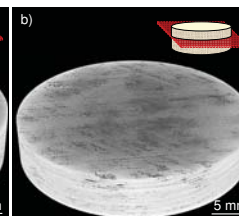
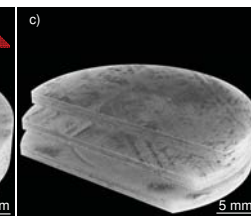


Abb. 6: CT-Aufnahme, 3D-Ansicht: a) Gesamtaufnahme



b) Schnitt ca. 1,5 mm unter der Oberfläche. Die dunklen Bereiche stellen Poren dar.



c) Schnitt quer und längs zur Faserorientierung. Die dunklen Bereiche stellen Poren dar.

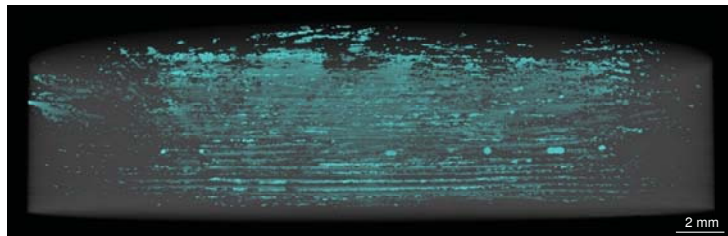


Abb. 7: CT-Aufnahme, 3D-Ansicht der Porenverteilung (türkis) im MD-CFK (Matrix und Fasern transparent). Die Poren treten ausschließlich in den etwa 30 bis 50 µm* starken Matrixschichten auf.

IV) Nanofokus-CT: Visualisierung der Fasern

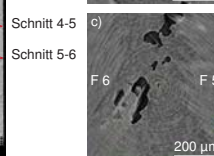
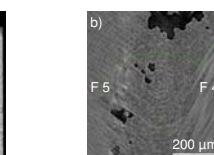
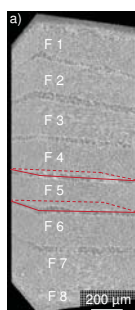


Abb. 8: CT-Aufnahme: a) 3D-Ansicht des MD-CFK. Einzelne Faserschichten F 1 bis F 8 (Dicke 200 bis 250 µm)* und dazwischen liegende Matrixschichten (Dicke 30 bis 50 µm)* zu erkennen.

b) Schnitt 4-5 aus Abb. 8 a), zu erkennen: einzelne Fasern der Schicht F 5 (links) und F 4 (rechts), sowie schwarze Poren in Matrixschicht (mittig).

c) Schnitt 5-6 aus Abb. 8 a), zu erkennen: einzelne Fasern der Schicht F 6 (links) und F 5 (rechts), sowie mittig: schwarze Poren in Matrixschicht.

V) Fazit

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Computertomographie zur Charakterisierung von CFK eignet. So ermöglicht die Mikrofokus-CT den Nachweis von Poren und deren Volumenverteilung in CFK Proben, deren Abmessungen im Zentimeterbereich liegen und daher eine gleichzeitige Ultraschallprüfung zulassen. Die Charakterisierung der CFK-Struktur bis hin zur Darstellung einzelner Fasern, deren Durchmesser zwischen 5 µm und 8 µm lagen, wurde mit einer hochauflösenden Nanofokus-CT an Proben mit Abmessungen im Millimeterbereich durchgeführt.

Kontakt: Christian.Fartely@intelligeNDT.de

Die computertomographischen Untersuchungen sind während meiner Abschlussarbeit an der Hochschule Aalen entstanden. Besonderer Dank gebührt der intelligeNDT Systems & Services GmbH für die Unterstützung dieser Arbeit.