

Quantitative Bestimmung von Porositätskenngrößen mittels Röntgencomputertomografie und 3D-Bildanalyse für kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) im Flugzeug- und Automobilbau

A. OCKERT^{*}, M. KEIGLER^{**}, R. MEIER^{***}, K. PFEFFER^{*}, A. SCHMIDT^{*},
S. SCHUHMACHER^{*},

^{*} Hochschule für Technik und Wirtschaft Aalen

^{**} C.F. Maier Europlast GmbH & Co Kg Königsbronn

^{***} intelligente NDT Systems & Services GmbH Erlangen

Kurzfassung. Aufgrund der erzielbaren Gewichtseinsparungen werden kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) in der Verkehrsindustrie in immer größerem Umfang eingesetzt. Zur Prüfung großer Bauteilabmessungen aus CFK, z.B. auf Klebefehler, haben sich Ultraschallprüfverfahren vielfach bewährt. Zur Optimierung der Ultraschallprüfung zum quantitativen Nachweis von Porosität sind Volumeninformationen zu den Porenkenngrößen notwendig, um eine tragfähige Korrelation zwischen Ultraschallmessgrößen und Porosität herzustellen. Die Röntgencomputertomografie kann hierzu die geeigneten Referenzgrößen liefern.

In dieser Arbeit wurden Porositätskenngrößen, wie Porengrößenverteilungen und Porenformfaktoren, in CFK-Proben mittels Röntgencomputertomografie und 3D-Bildanalyse ermittelt und anhand gezielter Schliifpräparation und Lichtmikroskopie validiert. Wichtig ist hierbei gewesen, die Kennwerte in Probenabmessungen charakterisieren zu können, welche ausreichend groß sind, um als Ausgangsbasis für die Entwicklung von Ultraschallprüfverfahren zu dienen.

Im ersten Schritt wurden verschiedene Verfahren der 3D-Bildanalyse untersucht. Durch Vergleich der virtuellen Schliifbilder (CT-Slices) mit den aus gezielter Schliifpräparation und Lichtmikroskopie erhaltenen Daten wurde das für die Problemstellung optimale Verfahren entwickelt, wobei die optischen Messungen als Referenz für die aus CT-Slices und 3D-Bildanalyse erhaltenen Daten verwendet wurden.

Das so gewonnene optimierte Verfahren diente im nächsten Schritt zur quantitativen Bestimmung der Porositätskennwerte für eine statistisch relevante Anzahl an Poren und Proben. Die Bewertung der Güte der Porencharakterisierung erfolgte durch Ermittlung der Messabweichung der Porenkenngrößen der CT-Slices von den mittels Lichtmikroskopie erhaltenen Größen derselben Ebenen. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass die entwickelten Werkzeuge die zerstörungsfreie dreidimensionale Bestimmung der Porositätskennwerte in CFK ermöglichen und als Untersuchungs- und Referenzmethode für die Entwicklung von Ultraschallprüfverfahren von essentieller Bedeutung sind.

Quantitative Bestimmung von Porositätskenngrößen mittels Röntgencomputertomografie und 3D-Bildanalyse für kohlenstoffaserverstärkte Kunststoffe im Flugzeug- und Automobilbau

A. Ockert¹, A. Schmidt¹, Dr. S. Schuhmacher¹, K. Pfeffer¹, Dr. M. Keigler², R. Meier³
¹ Hochschule Aalen – Technik und Wirtschaft, Studiengang Oberflächen- und Werkstofftechnik, Beethovenstraße 1, 73430 Aalen
² C.F. Maier Europlast GmbH & Co KG, Wiesenstraße 43, 89548 Königsbrunn, ³ Intelligente NDT Systems & Services GmbH, Paul-Gossen-Straße 100, 91052 Erlangen

I. EINLEITUNG

In Zeiten stetig steigender Anforderungen an die Energieeffizienz sind Gewichtseinsparungen und damit verbunden Werkstoffe mit hoher Leistungsfähigkeit gefragt. Faserverbundkunststoffe und hier insbesondere kohlenstoffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) zeichnen sich dadurch aus, dass ihre Struktur an die später aufzunehmenden Lasten angepasst werden kann, wodurch hohe Festigkeit bei erheblichen Gewichts- und Kosteneinsparungen realisierbar sind.

In der Industrie sind zahlreiche Herstellungsverfahren für CFK im Einsatz, von denen hauptsächlich die Autoklav- und Harzinjektionsverfahren (RTM) industriell eingesetzt werden, da durch diese höchste Bauteilfestigkeiten zu erreichen sind.

In dieser Arbeit werden die leistungsfähigen Werkzeuge zur dreidimensionalen quantitativen Charakterisierung von Porositätskennwerten in CFK-Strukturen mittels Röntgencomputertomografie und 3D-Bildanalyse entwickelt und eingesetzt.

II. ZIEL

- Herstellung der Versuchsbauteile mit künstlich eingebrachter Porosität für die nachfolgenden Untersuchungen der gezielten Schliifpräparation und Segmentierungsverfahren
- Röntgencomputertomografie der CFK-Proben.
- Verifizieren der CT-Aufnahmen mittels Schliifbild anhand der Zielpräparation und einem Vergleich eines CT-Slice mit dem entsprechenden Schliifbild
- Quantitative Bildanalyse mit statistischen Auswertung des CT-Messfehlers. Vergleich verschiedener Bildanalyseverfahren und Auswertung mit Bildbearbeitungssoftware.
- Bestimmung der Porosität mit quantitativer Aussage für verschiedene CFK-Volumenelemente.

III. VORGEHEN UND ERGEBNISSE

Geräte und Software

- Röntgencomputertomograph *phoenix|x-ray|v|tome|x|s* mit zwei Röntgenröhren (Mikro- und Nanofokus) mit 3D-Analys-Software VG StudioMax 2.0 von *Volume Graphics*®
- Präparationsmaschine von *Streuers*® RotoPol-31
- Auflichtmikroskop von *Zeiss Axio Plan 2* und *AxioVision 4.8* Software von *Carl Zeiss MicroImaging GmbH*



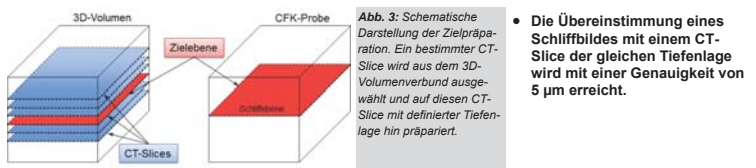
Abb. 1: Für die Untersuchungen verwendete Geräte der Hochschule Aalen: Computertomograph v|tome|x|s (a), Mikro- und Nanofokusröhre des Computertomografen (b), Streuers RotoPol-31 Präparationsmaschine (c) und Mikroskop Axio Plan 2 (d).

Herstellung der Versuchsbauteile und Vorbereitung der Versuchsproben



Abb. 2: Mittels RTM-Verfahren in 4 Hauptschritten (1-4) hergestellte CFK-Versuchsbauteilen. Entnommene CFK-Probe (rechts).

Materialgrafische Zielpräparation der CFK-Proben



- Die Übereinstimmung eines Schliifbildes mit einem CT-Slice der gleichen Tiefenlage wird mit einer Genauigkeit von 5 µm erreicht.

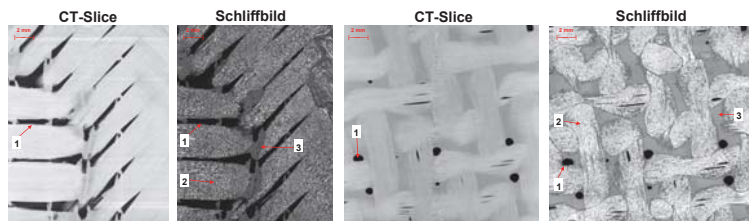


Abb. 4: CT-Slices und auf entsprechende Tiefenlage präparierte Schliifbilder unterschiedlichen CFK-Versuchsproben 1 - Porosität, 2 - Faser, 3 - Kunststoffmatrix

Segmentierung der Porosität

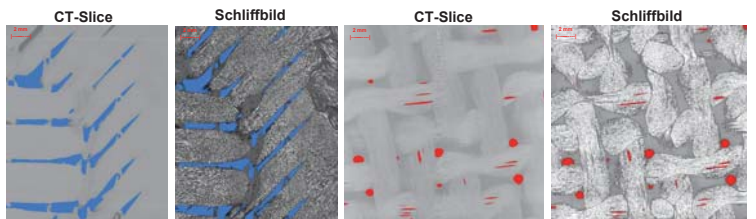


Abb. 5: Segmentierte CT-Slices und auf entsprechende Tiefenlage präparierte Schliifbilder.

Kontakt:
Andreas Ockert@htw-aalen.de
Alexander.Schmidt@htw-aalen.de

Untersuchungen von 3 Segmentierungsverfahren

Es wurden drei verschiedene Verfahren untersucht: Interaktiv, Momenten und Entropie.



- Die segmentierte Porosität lieferte festgelegte Porenkenngrößen, die miteinander verglichen werden können.

Abb. 6: Schematische Darstellung der untersuchten Segmentierungsverfahren.

Auswertung für eine statistisch relevante Anzahl an Poren in CFK-Versuchsproben

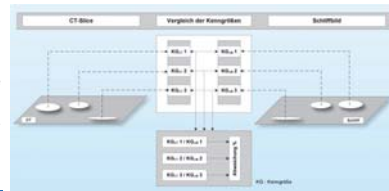


Abb. 7: Schematische Darstellung des statistischen Vergleiches für die Ermittlung der Abweichung eines CT-Bildes vom Schliifbild (Referenz).

Es wird ein statistisch relevanter Anzahl (N=90) an Poren wie folgt ausgewertet:

- Bildung des Vergleichspaares aus einer Pore im CT-Slice und desselben Pore im Schliifbild
- Bestimmung der relativen und absoluten Abweichungen für jede ermittelte Porenkenngröße
- Darstellung der relativen und absoluten Abweichungen für alle Porenkenngrößen über alle untersuchte CT-Slices

Abweichung der Porenkenngrößen von segmentierten CT-Slices und Schliifbildern für eine statistisch relevante Anzahl von Poren

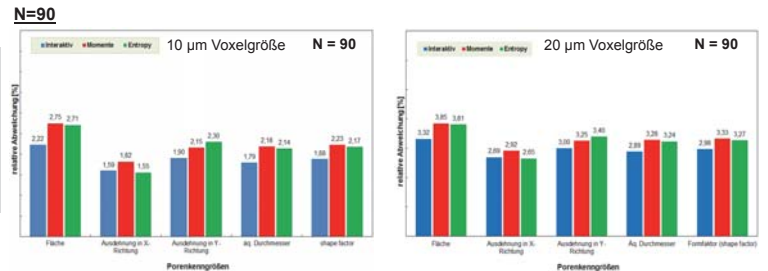


Abb. 8: Relative Abweichungen von Porositätskenngrößen aller untersuchten CT-Slices gegenüber dem Schliifbild.

ERGEBNISSE:

- CT und Schliifbilder liefern sehr gute Übereinstimmung mit einer relativen Abweichung von 2,75 % für 10 µm und 3,38 % für 20 µm Voxelgröße bei Flächenporositäten
- drei ausgewählten Verfahren liefern hervorragende Ergebnisse. Das Entropie- und Momenten-Verfahren liefern annähernd gleiche Ergebnisse bei der Segmentierung

3D-Volumenauswertung der Porositätskenngrößen in CFK-Versuchsproben mit den entwickelten Segmentierungsverfahren

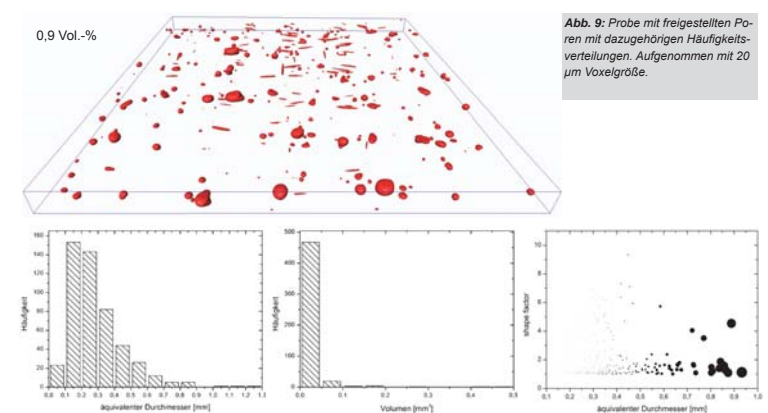


Abb. 9: Probe mit freigestellten Poren mit dazugehörigen Häufigkeitsverteilungen. Aufgenommen mit 20 µm Voxelgröße.

V. FAZIT

Die Ergebnisse zeigen, dass mit Hilfe von verschiedenen schwellenwertbasierenden Segmentierungsverfahren für die Auswertung computertomografischer Aufnahmen Porosität in CFK qualitativ und quantitativ erfasst werden kann. Die dabei angewendeten Segmentierungsmethoden ermöglichen die Charakterisierung, Vermessung und Abstimmung von Porosität in 3D-Volumen mit hoher Genauigkeit.

Die problemspezifisch angepassten Bildanalyseverfahren ermöglichen eine quantitative Beschreibung relevanter Porencharakteristika. Hierbei stand die Analyse bildmorphologischer Eigenschaften wie Struktur, längliche Ausdehnung sowie Bestimmung von Porositätskenngrößen, Porengrößenverteilung und Porenform in CFK im Mittelpunkt. Die Entwicklung von CT-basierten Verfahren zur Analyse dieser Eigenschaften schafft die Basis für die weiteren zukünftigen Untersuchungen.