

Laufzeit 01.12.2010 – 30.11..2012

Titel **Schnelle quantitative Faserstrukturanalyse mittels Computertomografie**

IGF-Vorhaben-Nr.: FV Nr. 16393 N (FGK-Nr. 8244)

Ziel des am DKI und später am LBF durchgeführten Projektes „Schnelle quantitative Faserstrukturanalyse mittels Computertomografie“ war es, einen neuartigen Auswertalgorithmus von Volumenbildern zur effizienten Ermittlung von Faseranteil, Faserlängenverteilung, orts aufgelöster Faserorientierung und -verteilung zu entwickeln.

Diese Informationen werden zur mechanischen Charakterisierung faserverstärkter Compounds benötigt. Faserverbundwerkstoffe zeichnen sich durch extrem hohe Steifigkeiten und Festigkeiten bei gleichzeitig niedrigem Gewicht aus und werden daher zunehmend für mechanisch hoch beanspruchte Bauteile, beispielsweise in der Automobil-, Luftfahrt- und Freizeitindustrie eingesetzt. Die in diesem Projekt entwickelten Methoden beziehen sich im Wesentlichen auf Kurzglasfaser verstärkte Materialien deren Faserlängen maximal einige mm betragen.

Während der Gesamtfaseranteil durch das Ausgangsmaterial (Granulat) festgelegt ist, beeinflussen verschiedene Verarbeitungsschritte die lokale Faserverteilung, die Faserlängenverteilung und die Faserorientierung. Während des Compoundierens wirken rheologische Eigenschaften der Schmelze sowie Wand- und Partikelwechselwirkungseffekte verkürzend auf die Faserlängenverteilung. Temperatur und Geometrie der Spritzgusskavität beziehungsweise die resultierenden Strömungsverhältnisse führen zu komplexen lokalen Faserorientierungsverteilungen im fertigen Produkt.

In plattenförmigen Formteilen mit linienförmigem Anschnitt bildet sich beispielsweise eine mehrschichtige, über den Querschnitt weitestgehend symmetrische Orientierung aus. Der wandnahe Bereich besteht aus einem dünnen, faserarmen Polymerfilm, welcher in der Regel der faserarmen Fließfront zugeschrieben werden kann. Daran schließt sich eine Schicht mit geringer Faserorientierung an. Aufgrund der Scherströmung in der Umgebung des hochviskosen „Haut-Kern-Grenzbereichs“ werden die Fasern in dieser Schicht in

**Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit
und Systemzuverlässigkeit LBF, Bereich
Kunststoffe**

Schlossgartenstr. 6

Phone: +49 6151 705-0
Fax: +49 6151 705-214
www.lbf.fraunhofer.de
info@lbf.fraunhofer.de

Die ungekürzte oder auszugsweise Wiedergabe dieses Berichts sowie seine Verwendung zu Werbezwecken bedarf der schriftlichen Genehmigung der Institutsleitung. © 2013 Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF

Reprints of this report or parts of it or its use for promotion purposes require the prior written permission of the director of the Fraunhofer Institute.

Fließrichtung orientiert. Weiter innen folgt eine Übergangschicht mit regelloser Faserorientierung, die von vorwiegend quer zur Fließrichtung angeordneten Fasern abgelöst wird.

Abbildung 1 zeigt mit mikromechanischen Modellen berechneten orientierungsabhängigen mechanischen Eigenschaften eines Compounds.

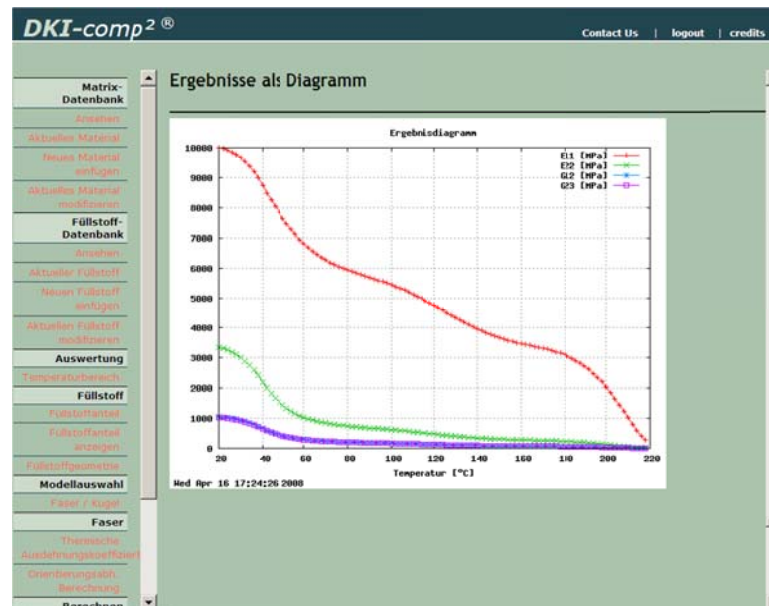


Abbildung 1: Internet Applikation DKI-comp² [11]. Grafische Darstellung der temperatur- und orientierungsabhängigen Elastizitäts- und Schubmoduln

Die in diesem Projekt entwickelten Algorithmen wurden zuerst an virtuellen Proben validiert und anschließend an μ CT-Aufnahmen schwach verstärkter Compounds und schließlich an kommerziellen kohle- und glasfaserverstärkten Compounds unterschiedlicher Matrixmaterialien verifiziert (siehe folgende Tabelle 1).

Als Proben für die μ CT-Aufnahmen wurden Granulatkörner und an verschiedenen Positionen ausgefräste Zylinder (Durchmesser 2 mm, Höhe entsprechend der Bauteildicke) verwendet. Abbildung 2 zeigt Geometrie des LBF-Zugstabs inklusive der Entnahmepositionen. Abbildung 3 zeigt die Geometrie des untersuchten Praxisbauteils.

Form	Polymer	Verstärkung	Durchmesser (μm)	Anteil (Gew. %)	Auflösung (μm)
Granulat	PP	Glaskugeln	50	unbek.	1,8
		Glasfasern	16	0,5 Vol. % 2,0 Vol. % 4,0 Vol. %	
LBF-Zugstab	PA	Kohlefasern	12	15	30
				30	
				50	
	PBT			30	
	PP			10	
				20	
	PBT			30	
				10	
	20				
	30				
	10				
	20				
	30				
	15				
Folie	PP		16	30	
LBF-Kastenbauteil	PP			30	

Tabelle 1: Verwendete Bauteile, Proben und Materialpaarungen

Die μCT -Messungen dieses Projektes wurden mit der LBF eigenen Messapparatur Sky-Scan 1172 mit folgenden Parametern aufgenommen 20 - 100 kV / 0 - 250 μA unterhalb der maximalen Leistung von 10 W. Die Volumenbildgröße eines Einzelscans betrug 1024 x 1024 x 900 kubische Voxel. Die minimale Voxel-Kantenlänge betrug 1,8 μm . Die Bauteiloberfläche wurde im Bereich der Probenentnahmestelle so präpariert, dass die Fließrichtung (y-Achse des Bauteilkoordinatensystems) später in der μCT -Aufnahme sichtbar war.

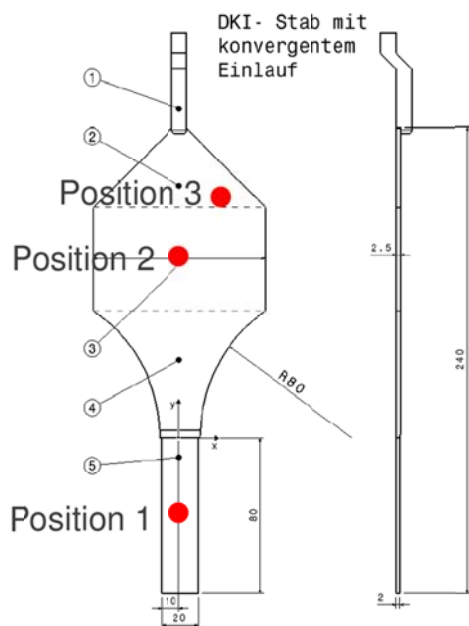


Abbildung 2: LBF-Zugstab mit konvergentem Einlauf. Manuelle μ CT-Auswertungen wurden an Proben aus Position 1, 2 und 3 durchgeführt.



Abbildung 3: Kastenbauteil, PA GF 20 mit Ruß (links) und PBT GF 20 (rechts) mit zentralem Anguss an der Bodenunterseite

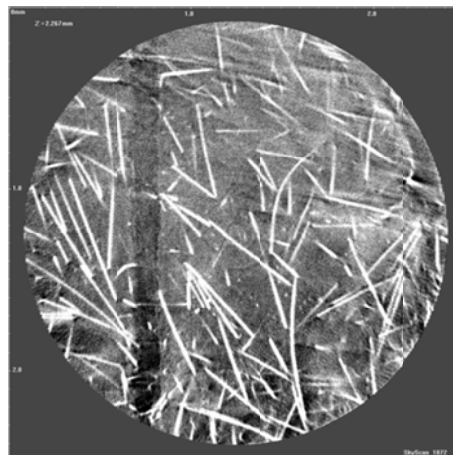


Abbildung 4: μ CT-Schichtbild mit sichtbarer Markierung der Fließrichtung

Die μ CT-Aufnahmen, bzw. die dreidimensionalen Dichteinformationen wurden zunächst binarisiert und anschließend mit einem iterativen und parallel ausgelegten Fasererkennungsalgorithmus analysiert. Abbildung 5 zeigt die entwickelte Prozesshierarchie und die Datenflüsse der parallelisierten Fasererkennung.

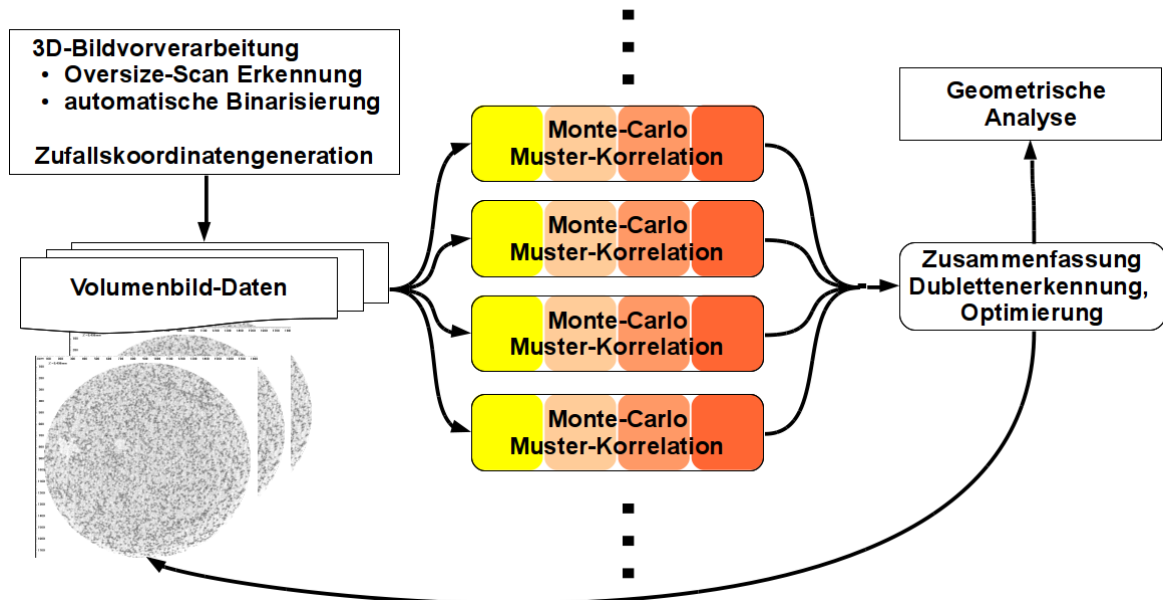


Abbildung 5: Prozesshierarchie und Datenflüsse der parallelisierten Fasererkennung.

Die Fasererkennung kann unabhängig auf mehreren Prozessoren eines Rechners oder auch auf verschiedenen Rechnern parallel ausgeführt werden. Zufällig gewählte Startpositionen der Fasererkennung führen dabei zwangswise zu Mehrfacherkennungen. Aus diesem Grund enthalten die Fasererkennungsdaten Informationen über die jeweilige Erkennungsgüte. Diese Metrik wird beim Zusammenführen von Erkennungsdaten verwendet, um im Falle von Mehrfacherkennungen die möglichst beste für die jeweilige Faser auszuwählen und so die Gesamterkennungsqualität zu verbessern.

Zwecks Verifikation der erzielten Ergebnisse wurden Faserschnittbilder in verschiedenen Höhen anhand von Einzelaufnahmen der μ CT-Volumenbilder manuell vektorisiert und der Quotient der Richtungskomponenten mit dem Quotienten der entsprechenden Hauptkomponente des Orientierungstensors verglichen (Abbildungen 6 und 7).

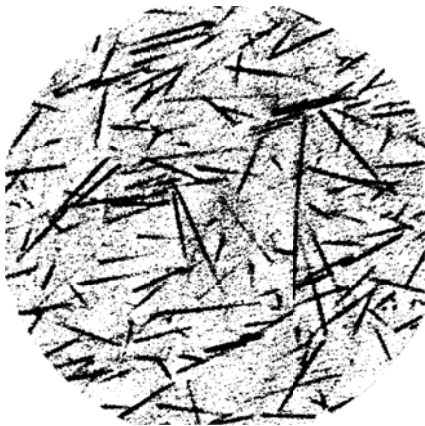


Abbildung 6: Beispiel einer manuellen μ CT-Analyse.

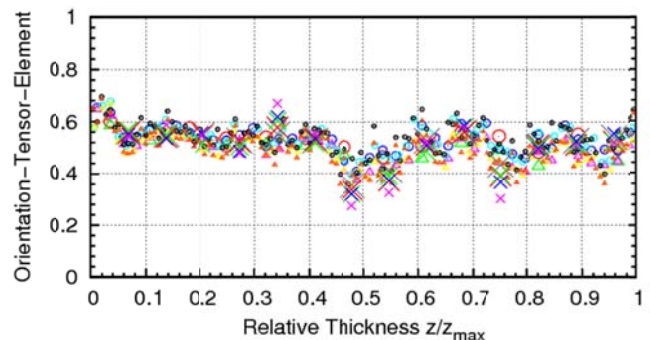


Abbildung 7: Gegenüberstellung manuell und automatisch detektierter Faserorientierungen. Die Daten wurden sowohl örtlich (Schichten) als auch geometrisch (Längenfraktionen) gefiltert.

Für die Verifikation der Faserlängenverteilung wurden Proben verarscht und die Faserrückstände manuell mikroskopisch vermessen. Die Ergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung (Abbildungen 8 und 9).

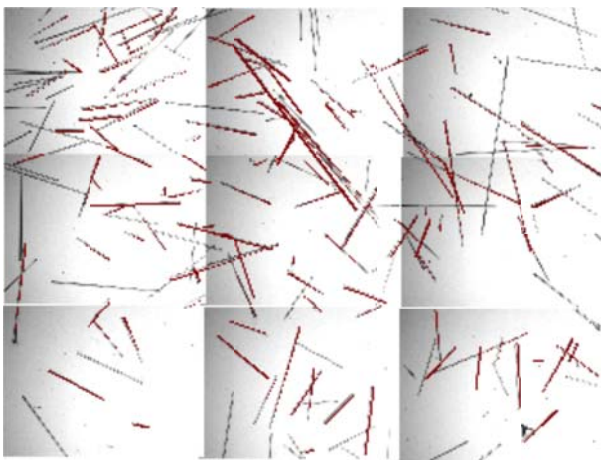


Abbildung 8: Manuelle Mikroskopanalyse zur Bestimmung der Faserlängenverteilung.

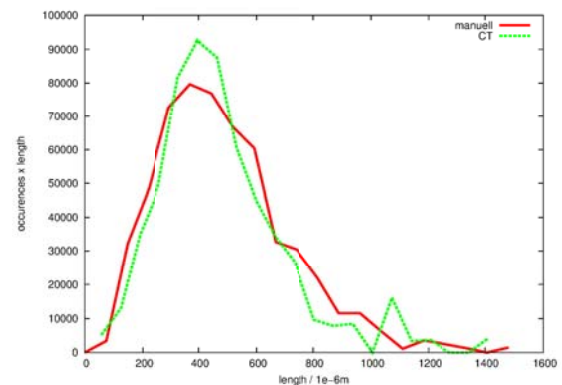


Abbildung 9: Vergleich einer automatischen Faserlängenanalyse mit einer manuell durchgeführten Mikroskopbildanalyse.

Die Faserorientierung wird üblicherweise in Form eines zweidimensionalen Orientierungstensors angegeben. Dieser ergibt sich unter Annahme gleicher Geometrie aller Fasern als Summe der dyadischen Produkte der Faserorientierungen. Berücksichtigt man zusätzlich Variationen des Radius (r_k) und der Länge (Δz_k) so ergeben sich die Orientierungstensor-Komponenten zu:

$$a_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^N \Delta z_k \cdot r_k^2} \cdot \sum_{k=1}^N \Delta z_k \cdot r_k^2 \cdot (n_k)_i \cdot (n_k)_j \quad (1)$$

Für eine lokale Auswertung, beispielsweise in 20 äquidistanten Höhenschichten der Probe, kann man die gefundenen Fasern eindeutig über deren Faserschwerpunkt zuordnen. Die folgende Abbildung 10 zeigt die Entwicklung der Diagonalelemente des Orientierungstensors über die Höhe einer Probe.

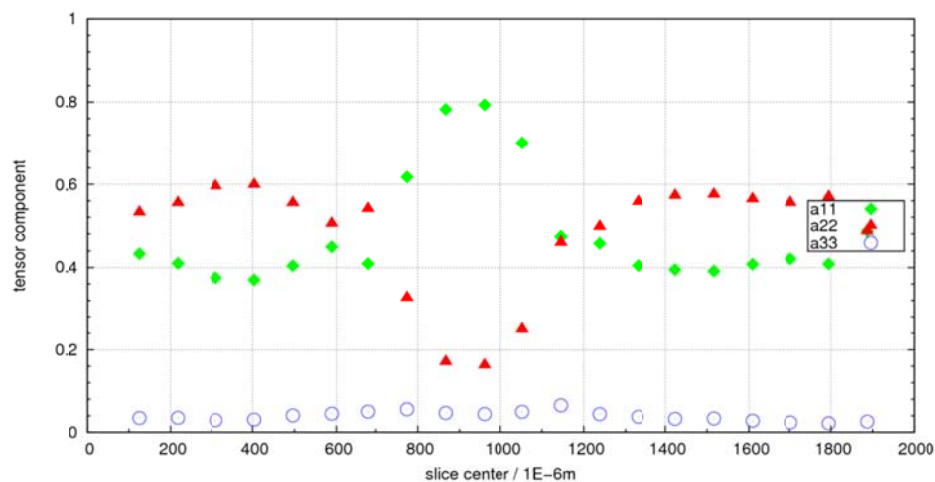


Abbildung 10: Schichtweise Entwicklung der Hauptkomponenten in Fließrichtung (a_{22}), senkrecht zur Fließrichtung in der Plattenebene (a_{11}) und senkrecht zur Plattenebene (a_{33}).

Auf Anregung verschiedener Industriepartner wurde ein Reportgenerator mit grafischer adaptiver Benutzerschnittstelle implementiert. Dieser generiert einen Report im PDF-Format, Einzeldiagramme im EPS-Format, CSV-Dateien für den Import in gängige Tabellenkalkulationsprogramme und STL-Dateien für den Import in CAD oder Struktursimulationsprogramme. Der Report enthält üblicherweise folgende Informationen:

- Informationen zur Probenpräparation
- lokale, Volumen gewichtete Faserorientierungsverteilung in Form der Hauptkomponenten des zweistufigen Orientierungstensors
- lokale Materialdichte
- lokale, Volumen gewichtete mittlere Faserlängen
- lokale, Volumen gewichtete mittlere Faserdicken
- Volumen und Anzahl gewichtete Faserlängenverteilung der Gesamtprobe
- vollständige dreidimensionale Information über jede erkannte Faser als CSV-Datei:
 - Position, Orientierung, Länge, Durchmesser, Dichte
- Export der Faserdaten als STL-Datei

Die folgenden Abbildungen zeigen die mögliche Einbindung der Daten in CAD (Abbildung 11), FEM (Abbildung 12) und Tomografievisualisierungssoftware (Abbildung 13).



Abbildung 11: Import der STL-Daten in FreeCAD^(R).

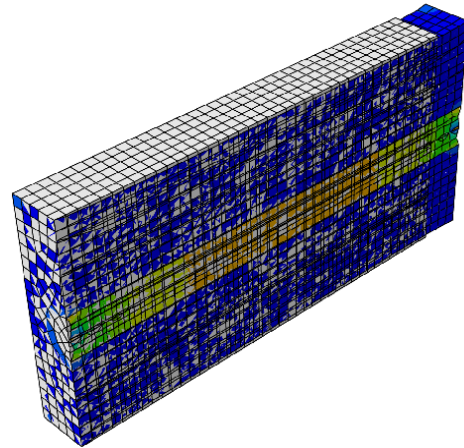


Abbildung 12: Vernetzung importierter STL-Daten in Abaqus^(R).

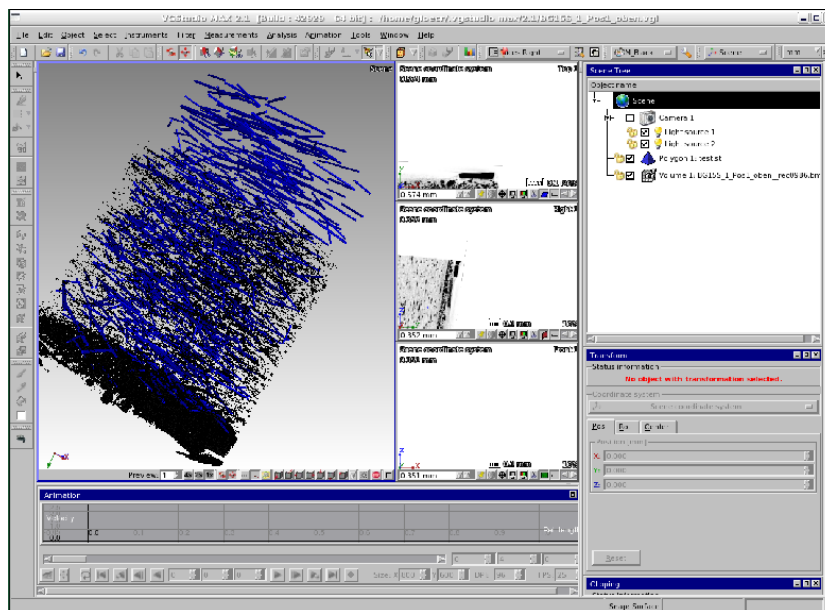


Abbildung 13: Überlagerung importierter STL-Daten mit μ CT-Daten in VG-Studiomax^(R).

Kontakt: Dr.-Ing. Jürgen Wieser, Tel.: +49 6151 705-8725;
juegen.wieser@lbf.fraunhofer.de

Dipl.-Phys. Robert Glöckner, Tel.: +49 6151 705-8757;
sebastian.moennich@lbf.fraunhofer.de

Danksagung und Bestellhinweis

Das IGF-Vorhaben FV Nr. 16393 N (FGK-Nr. 8244) der Forschungsvereinigung Forschungsgesellschaft Kunststoffe e.V. (FGK, Schlossgartenstraße 6, 64289 Darmstadt) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung.
Die gesamten Forschungsergebnisse können einem umfangreichen Forschungsbericht entnommen werden, der zum Selbstkostenpreis beim Fraunhofer LBF bestellt werden kann. Die Rechnung wird mit dem Bericht zugeschickt.
