

3D Modellierung der Pulsthermographie an porösen kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen

Josef SUCHAN *, Karl-Heinz GRESSLEHNER *, Günther HENDORFER *,
Günther MAYR *, Jakov SEKELJA **

* Fachhochschule Oberösterreich Forschungs & Entwicklungs GmbH, Wels, Österreich

** FACC AG, Ried im Innkreis, Österreich

Kurzfassung

Eine kritische Fehlerklasse bei kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) sind Poren in der Kohlenstofffaser / Epoxidharzmatrix. Eine erhöhte Konzentration von Lufteinschlüssen führt dabei zu einer Verminderung der interlaminaren Scherfestigkeit, der Druckfestigkeit und der Biegefestigkeit. Die Ansammlung einer Vielzahl mikroskopisch kleiner Hohlräume wird als Porosität bezeichnet. Die Poren sind von der geometrischen Abmessung her zu klein, um mit konventionellen Verfahren der aktiven Thermographie als Einzelfehler erkannt zu werden. In ihrer Gesamtheit führen sie jedoch zu einer signifikanten Verminderung der Wärme- und Temperaturleitfähigkeit des Materials, welche mit Auswertemethoden der Pulsthermographie bestimmt werden können. Ziel dieser Arbeit ist es, die Zusammenhänge zwischen den mikrostrukturellen Eigenschaften, wie Form, Größe, Verteilung und Anzahl der Hohlräume, und den daraus resultierenden effektiven thermophysikalischen Eigenschaften zu analysieren. Mithilfe numerischen 3D Simulationsrechnungen auf Basis der Finiten Elemente Methode (FEM) wird das Temperaturfeld und das daraus abgeleitete Gradientenfeld der Wärmestromdichte für einen porösen CFK-Körper berechnet. Das geometrische Modell für die FEM Simulation wird anhand von 3D Röntgen-Computertomographie Aufnahmen erstellt. Die numerischen Berechnungen werden mittels stationärer und nicht-stationärer Wärmeleitungsgleichung durchgeführt. Aus den numerischen Ergebnissen wird durch Zuhilfenahme von analytischen Lösungen der Wärmeleitungsgleichung die lokale Wärmeleitfähigkeit bzw. die Temperaturleitfähigkeit berechnet. Die 2D Wärme- und Temperaturleitfähigkeitsbilder korrelieren mit Ergebnissen aus der Pulsthermographiemessung. Zusätzlich werden die 2D Darstellungen der effektiven Materialeigenschaften auch mit Porositätsbildern verglichen. Als Porositätsbild wird dabei die 2D Darstellung der lokalen Porosität eines 3D Körpers bezeichnet. Der Vergleich zeigt, dass erst durch die räumliche Mittelung der thermophysikalischen Eigenschaften eine gute Übereinstimmung zur Verteilung der Porosität erzielt werden kann.



EINLEITUNG

Eine kritische Fehlerklasse bei kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) sind Poren in der Kohlenstoff-faser/Epoxidharzmatrix. Eine erhöhte Konzentration von Luft einschließen führt dabei zu einer Verminderung der interlaminaeren Scherfestigkeit, der Druckfestigkeit und der Biegefestigkeit. Ziel dieser Arbeit ist es, die Zusammenhänge zwischen den mikrostrukturellen Eigenschaften, wie Form, Größe, Verteilung und Anzahl der Hohlräume, und den daraus resultierenden effektiven thermophysikalischen Eigenschaften zu analysieren. Mithilfe numerischen 3D Simulationsrechnungen auf Basis der Finiten Elemente Methode (FEM) wird das Temperaturfeld und das daraus abgeleitete Gradientenfeld der Wärmestromdichte für einen porösen CFK-Körper berechnet. Aus den numerischen Ergebnissen wird durch Zuhilfenahme von analytischen Lösungen der Wärmeleitgleichung die lokale Wärmeleitfähigkeit bzw. die Temperaturleitfähigkeit bestimmt. Durch Anwendung der Maxwell-Garnett Approximation kann man aus diesen effektiven thermophysikalischen Werten auf die lokale Porosität schließen.

VISUALISIERUNG DER MIKROSTRUKTUR

Das geometrische Modell für die FEM Simulation wird anhand von 3D Röntgen-Computertomographie Aufnahmen erstellt. Die räumliche Auflösung der Messung beträgt dabei $(10\mu\text{m})^3$. In Abbildung 1 und 2 ist exemplarisch eine Porenverteilung von einer CFK Probe dargestellt.

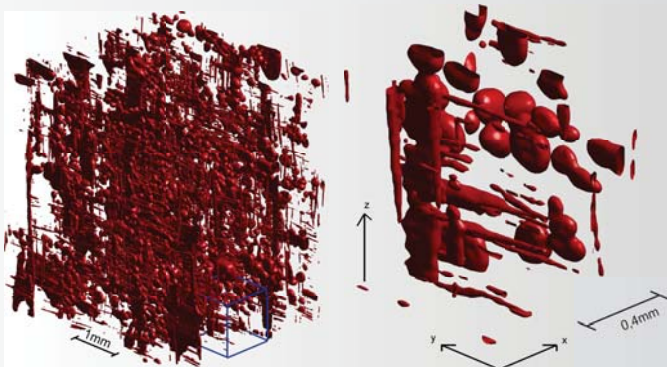


Abb. 1: 3D-Darstellung einer Probe mit einer Porosität von $\Phi = 5,11\%$.

Abb. 2: Vergrößerte Darstellung des blau markierten Teilbereichs aus Abb. 1.

CHARAKTERISIERUNG DER MIKROSTRUKTUR

Die Zweipunktkorrelationsfunktion (2-PKF) ermöglicht die Bestimmung der mittleren Porengröße und ob eine statistisch homogene Verteilung der Poren in der Probe vorliegt. Die 2-PKF ist mit

$$S_2^{(j)}(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \langle \mathcal{I}^{(j)}(\vec{r}_1) \cdot \mathcal{I}^{(j)}(\vec{r}_2) \rangle \quad (1)$$

definiert, wobei \vec{r}_1 und \vec{r}_2 zwei Ortsvektoren zu beliebigen Punkten innerhalb des Systems darstellen. Spitze Klammern kennzeichnen den Mittelwert über die Probe. $S_2^{(j)}(\vec{r}_1, \vec{r}_2)$ ist die Wahrscheinlichkeit, dass zwei Punkte an den Positionen \vec{r}_1 und \vec{r}_2 beide in Phase j liegen.

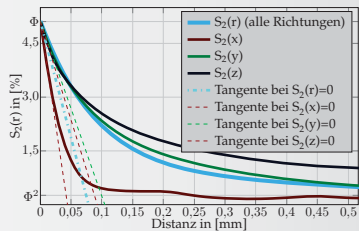


Abb. 4: Darstellung der Zweipunktkorrelationsfunktionen mit den dazugehörigen Tangenten.

Aus der 2-PKF kann auf die mittlere Größe der Poren geschlossen werden. Der Zusammenhang zwischen der Steigung der Zweipunktkorrelationsfunktion im Nullpunkt und der spezifischen Oberfläche s ist mit

$$\frac{dS_2(r)}{dr} = -\frac{s}{4} \quad (2)$$

gegeben. Die spezifische Oberfläche ist definiert durch den Quotienten der Gesamtoberfläche aller Poren und deren Volumen. Aus der ermittelten spezifischen Oberfläche können nun die Achsenlängen eines Ellipsoids näherungsweise bestimmt werden.

Mit Kenntnis der spezifischen Oberfläche und der Steigungen der Zweipunktkorrelationsfunktion in x -, y - und z -Richtung, können die mittleren Achsenlängen der Poren berechnet werden.

In einem statistisch homogenen Medium hängt $S_2^{(j)}(\vec{r}_1, \vec{r}_2)$ nur vom Abstand $r = |\vec{r}_1 - \vec{r}_2|$ zwischen zwei Punkten ab und wird als $S_2^{(j)}(r)$ bezeichnet. Sind die Poren in einer Probe statistisch homogen verteilt, dann gilt

$$\lim_{r \rightarrow \infty} S_2(r) = \Phi^2 \quad (3)$$

VORGEHENSWEISE BEI DER MODELLIERUNG

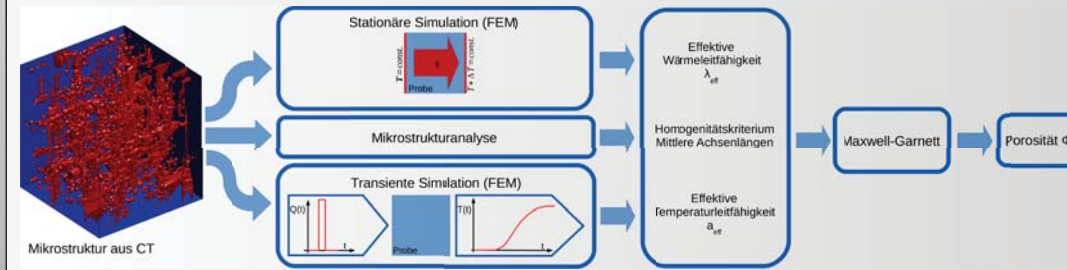


Abb. 3: Schematischer Ablauf der Simulation.

WÄRMELEITFÄHIGKEIT

Die effektive Wärmeleitfähigkeit der Probe wird aus einer stationären Simulation ermittelt. Zwischen den Stirnflächen der Probe liegt eine Temperaturdifferenz ΔT . Aufgrund des Temperaturgradienten stellt sich ein Wärmefluss mit der Wärmestromdichte \dot{q} ein. Aus der gemittelten Wärmestromdichte

$$\langle \dot{q} \rangle = \frac{1}{A} \int_{y=0}^{l_y} \int_{x=0}^{l_x} \dot{q}(x, y) dx dy, \quad (11)$$

kann die effektive Wärmeleitfähigkeit für das gewählte repräsentative Volumen mit der Kantenlänge l_x und l_y wie folgt

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{\langle \dot{q} \rangle \cdot L}{\Delta T} \quad (12)$$

mit der Probendicke L berechnet werden.

TEMPERATURLEITFÄHIGKEIT

Die effektive Temperaturleitfähigkeit ist bei quasistationären Verhältnissen mit

$$a_{\text{eff}} = \frac{\lambda_{\text{eff}}}{\rho_{\text{eff}} \cdot c_{\text{eff}}} \quad (13)$$

definiert.

Zur Ermittlung der effektiven Temperaturleitfähigkeit der Mikrostruktur wird eine transiente Simulation durchgeführt. Diese ist einem realen Pulsthermographieexperiment nachgebildet. Aus den räumlich gemittelten Temperaturverläufen

$$\langle T(t) \rangle = \frac{1}{A} \int_{y=0}^{l_y} \int_{x=0}^{l_x} T(t, x, y) dx dy. \quad (14)$$

wird durch Anwendung der LDF- und TSR-Methode die effektive Temperaturleitfähigkeit bestimmt [3],[4].

MAXWELL-GARNETT APPROXIMATION

Die Maxwell-Garnett Approximation (MG) wird in dieser Arbeit dazu verwendet, den Zusammenhang zwischen der mit der numerischen Simulation berechneten Wärmeleitfähigkeit und der Mikrostruktur des porösen CFK zu beschreiben. Sie lautet

$$(1 - \Phi) \cdot (\lambda_M - \lambda_{\text{eff}}) + \Phi \frac{\lambda_P - \lambda_{\text{eff}}}{1 + \eta \frac{\lambda_P - \lambda_{\text{eff}}}{\lambda_M}} = 0, \quad (4)$$

mit dem Entthermalisierungsfaktor η . Dieser lautet laut, für die x -, y - und z -Richtung,

$$\eta_x = \frac{\cos \varphi \cos \vartheta}{\sin^3 \vartheta \sin^2 \alpha} \cdot (F(k, \vartheta) - E(k, \vartheta)) \quad (5)$$

$$\eta_y = \frac{\cos \varphi \cos \vartheta}{\sin^3 \vartheta \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha} \cdot \left(E(k, \vartheta) - \cos^2 \alpha \cdot F(k, \vartheta) - \frac{\sin^2 \alpha \sin \vartheta \cos \vartheta}{\cos \varphi} \right) \text{ und} \quad (6)$$

$$\eta_z = \frac{\cos \varphi \cos \vartheta}{\sin^3 \vartheta \cos^2 \alpha} \cdot \left(\frac{\sin \vartheta \cos \varphi}{\cos \vartheta} - E(k, \vartheta) \right). \quad (7)$$

Diesen Formeln liegen folgende Zusammenhänge zugrunde.

$$\cos \vartheta = c/a, \quad (0 \leq \vartheta \leq \pi/2),$$

$$\cos \varphi = b/a, \quad (0 \leq \varphi \leq \pi/2) \text{ und}$$

$$\sin \alpha = \left(\frac{1 - (b/a)^2}{1 - (c/a)^2} \right)^{1/2} = \frac{\sin \varphi}{\sin \vartheta}, \quad (0 \leq \alpha \leq \pi/2).$$

$F(k, \vartheta)$ und $E(k, \vartheta)$ sind elliptische Integrale der ersten und zweiten Art und sind mit

$$E(k, \vartheta) = \int \frac{d\vartheta}{\sqrt{1 - k^2(\sin \vartheta)^2}} \text{ und} \quad (8)$$

$$F(k, \vartheta) = \int \sqrt{1 - k^2(\sin \vartheta)^2} d\vartheta \quad (9)$$

definiert [2].

Mit Kenntnis des Entthermalisierungsfaktors, der Materialeigenschaften der Matrix und der Pore kann aus der Maxwell-Garnett Approximation die Porosität mit

$$\Phi = \frac{(\lambda_{\text{eff}} - \lambda_M) \cdot (\lambda_M + \eta \cdot (\lambda_P - \lambda_M))}{(\lambda_P - \lambda_M) \cdot \lambda_M - \eta \cdot (\lambda_M - \lambda_P) \cdot (\lambda_{\text{eff}} - \lambda_M)} \quad (10)$$

berechnet werden [1].

FINITE ELEMENTE METHODE (FEM)

Die numerischen Simulationen wurden mithilfe der FEM durchgeführt. Folgende Materialparameter und Randbedingungen wurden bei der Simulation verwendet:

Materialparameter			
Parameter	Matrix	Pore	Einheit
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda_M = 0,7$	$\lambda_P = 0,026$	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
Dichte	$\rho_M = 1600$	$\rho_P = 1,3$	kg/m^3
spez. Wärmekapazität	$c_M = 1200$	$c_P = 1005$	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

Randbedingungen	
Anregungsintensität	$Q = 10 \cdot 10^6 \text{ W}/\text{m}^2$
Pulsdauer	$t = 1,1 \text{ ms}$
keine Konvektion	
keine Wärmestrahlung	

ERGEBNISSE

Bei der stationären Simulation wird die Porosität über die effektive Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} für berechnet.

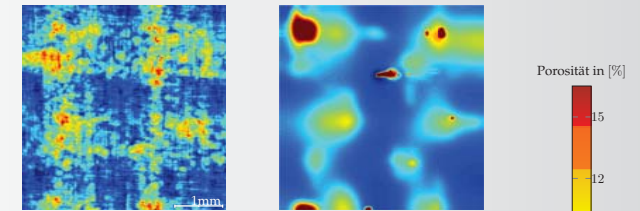


Abb. 5: Porositätsbild von CT-Daten.

Abb. 6: Porositätsbild aus stationärer Simulation.

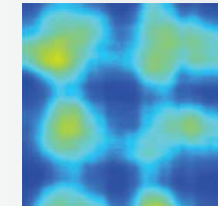


Abb. 7: Porositätsbild (CT) nach räumlicher Mittelung.

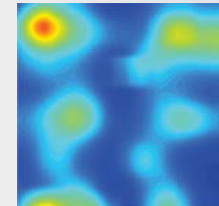


Abb. 8: Porositätsbild (FEM) nach räumlicher Mittelung.

Über die Temperaturleitfähigkeit kann mit der transienten Simulation auf die Porosität zurückgerechnet werden (siehe Abb. 9).

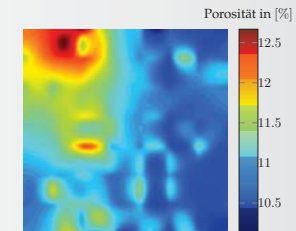


Abb. 9: Porositätsbild aus transienter FEM-Simulation.

REFERENZEN

- TORQUATO, S.: Random Heterogeneous Materials: Microstructure and Macroscopic Properties. 1. London : Chapman & Hall
- OSBORN, J.A.: Demagnetizing factors of the general ellipsoid. in: Physical Review 67 (1945). Nr. 11-12, S. 351-357
- HENDORFER, G.; MAYR, G.; ZAUNER, G.; HASLHOFER, M.; PREE, R. Quantitative determination of porosity by active thermography. In: THOMPSON, D.O. (Hrsg.); CHIMENTI, D.E. (Hrsg.): Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation Bd. 26A, AIP Conference Proceedings Vol. 894, 2006, S. 702-708
- CHOY, T.C.: International Series of Monographs on Physics. Bd. 102: Effective Medium Theory — Principles and Applications. New York : Oxford University Press, 1999