

Anwendung der Homogenisierungstheorie bei der quantitativen Prüfung von porösen kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen mit Pulsthermographie

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

* Fachhochschule Oberösterreich Forschungs & Entwicklungs GmbH, Wels, Österreich
** FACC AG, Ried im Innkreis, Österreich

Kurzfassung

Poröser kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK) ist ein heterogenes Material. Die eingeschlossenen Poren führen zu verminderten mechanischen Eigenschaften. In dieser Arbeit wird ein analytisches Modell vorgestellt, welches den Zusammenhang zwischen der mit der Pulsthermographie berechneten Temperaturleitfähigkeit und der Mikrostruktur des porösen CFK beschreibt. Aus der Temperaturleitfähigkeit kann dadurch direkt der Porositätsgehalt bestimmt werden. Bei der Modellierung geht man von einer kontinuierlichen Epoxidharz – Kohlenstofffasermatrix und einer dispersen Phase der Poren aus. Die Materialeigenschaften, wie Wärmeleitfähigkeit, Dichte und Wärmekapazität sind materialabhängige und damit ortsabhängige Funktionen. Aufgrund der hohen Anzahl der Poren und deren geometrischer Form ist es nicht mehr praktikabel, die Wärmeleitungsgleichung auf mikroskopischer Ebene analytisch zu lösen. Zielführend ist es, das Verhalten global zu betrachten und eine Homogenisierung des Materials durch räumliche Mittelung der Stoffeigenschaften über ein repräsentatives Elementarvolumen (REV) vorzunehmen. Damit kann die effektive Wärmeleitfähigkeit bestimmt werden, welche eine gute Näherung für die lokale Wärmeleitung im feinskaligen Material liefert. Das Verfahren der Homogenisierung erfordert hierfür eine hierarchische Separation der Längenskalen: mikroskopische Ebene (Poren), mesoskopische Ebene (mathematische Analyse) und makroskopische Ebene (Bauteil). Das REV muss eine ausreichende Anzahl von Poren mit einer statistischen Verteilung enthalten. Die statistische Homogenität wird durch Anwendung der Autokorrelationsfunktion bestätigt. Um noch eine vernünftige Ortsauflösung bei der makroskopischen Beschreibung zu erreichen, muss das mesoskopische REV deutlich kleiner als das makroskopische Bauteil sein. Für die Berechnung der effektiven Wärmeleitfähigkeit wird die erweiterte Maxwell-Garnett Approximation verwendet. Die Ergebnisse des analytischen Modells werden mit numerischen Berechnungen an realen CFK Strukturen und mithilfe von Schranken der Wärmeleitfähigkeit validiert. Bei passender Wahl der Größe des REV kann mit einer hohen Genauigkeit die lokale Porosität in CFK mit Methoden der Pulsthermographie zeit- und kostensparend bestimmt werden.



Anwendung der Homogenisierungstheorie bei der quantitativen Prüfung von porösen kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen mit Pulsthermographie



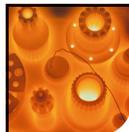
G. Mayr^{1*}, G. Hendorfer², K.-H. Gresslehner¹, J. Suchan¹ & J. Sekelja³

¹ FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH, Stelzhamerstraße 23, 4600 Wels, AUSTRIA

² FH OÖ Studienbetriebs GmbH, Stelzhamerstraße 23, 4600 Wels, AUSTRIA

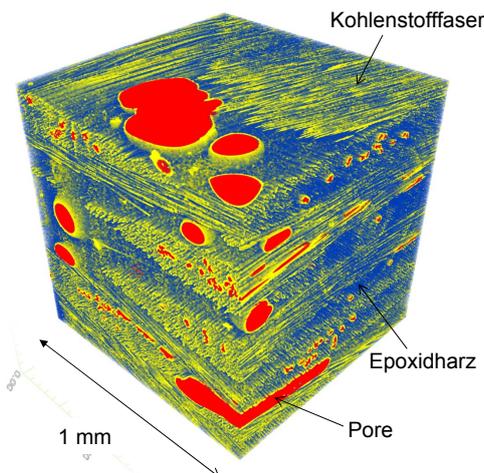
³ FACG AG, Fischerstraße 9, 4603 Ried im Innkreis, AUSTRIA

FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH • Hagenberg • Linz • Steyr • Wels



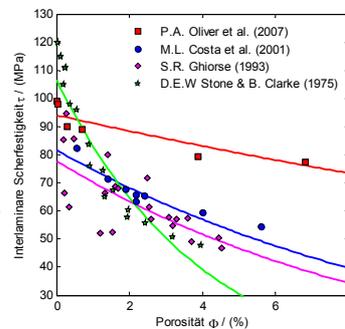
Einführung

Porosität in kohlefaserverstärkten Kunststoffen



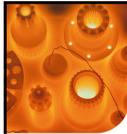
Ursachen:

- unregelmäßige Benetzung der Fasern
- unangepasste Druckverhältnisse
- unvollständige chem. Reaktionen
- Ausgasungen von Verunreinigungen
- schlechte Belüftung



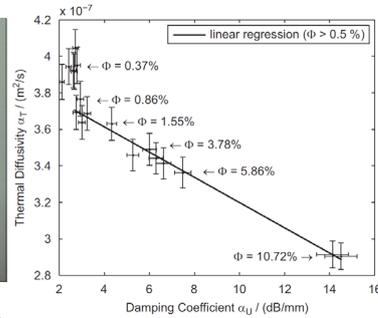
FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH • Hagenberg • Linz • Steyr • Wels

slide 2

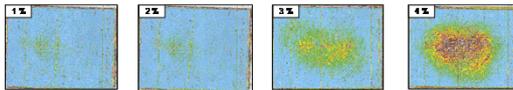


Einführung

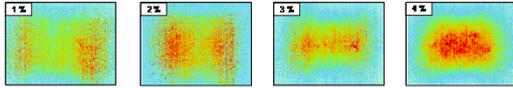
Nachweis von Porosität mit Aktiver Thermographie



Ultrasonic C-scan images



Active Thermography - Diffusivity images



Zielsetzung

Modellbasierte Bestimmung der Porosität durch die gemessene Temperaturleitfähigkeit

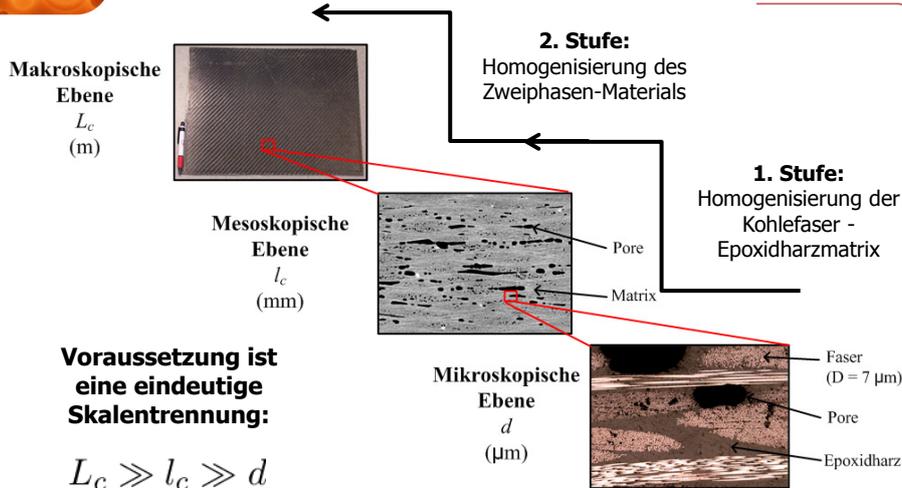
FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH • Hagenberg • Linz • Steyr • Wels

slide 3



Mehrskalenanalyse

Mikro-, meso- & makroskopische Betrachtung



FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH • Hagenberg • Linz • Steyr • Wels

slide 4



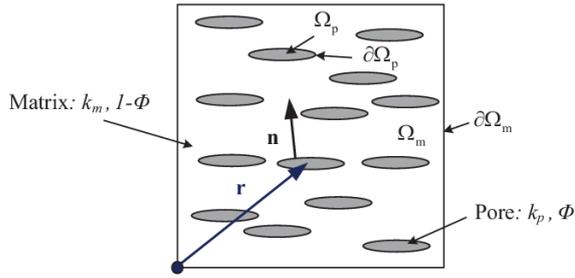
Wärmeleitung - mesoskopisch

Heterogenes Material mit zwei Phasen



$$\rho(\mathbf{r}) c_p(\mathbf{r}) \frac{\partial T(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = \nabla \cdot (\boldsymbol{\lambda}(\mathbf{r}) \nabla T(\mathbf{r}, t))$$

$$\boldsymbol{\lambda}(\mathbf{r}) = \begin{cases} \lambda_p, & \mathbf{r} \in \Omega_p \\ \lambda_m, & \mathbf{r} \in \Omega_m \end{cases}$$

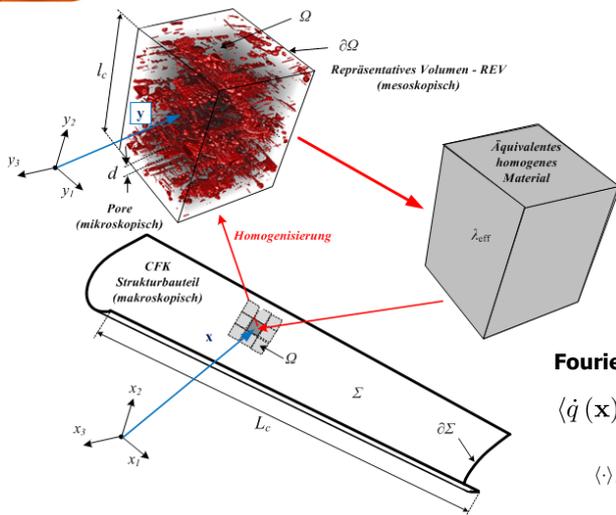


Interne Randbedingungen: $T_m = T_p$ und $\mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{q}}_m = \mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{q}}_p$ auf $\partial\Omega_p$



Homogenisierung

Repräsentatives Elementarvolumen - REV



\mathbf{x} ... makroskopisches Koordinatensystem

\mathbf{y} ... mesoskopisches Koordinatensystem

Fourier'sches Wärmeleitgesetz

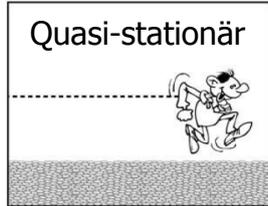
$$\langle \dot{\mathbf{q}}(\mathbf{x}) \rangle = -\lambda_{\text{eff}}(\mathbf{x}) \langle \nabla T_0(\mathbf{x}) \rangle$$

$\langle \cdot \rangle$...Volumenmittel über ein REV

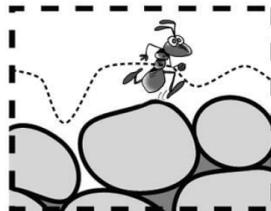
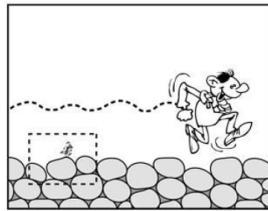


Quasistationäre Betrachtung

Abhängigkeit vom Beobachter (thermischen Welle)



Λ ... charakteristische thermische Wellenlänge



Quelle: J.-L. Auriault et al. *Homogenization of Coupled Phenomena in Heterogeneous Media*, Wiley, 2009.



Quasistationäre Betrachtung

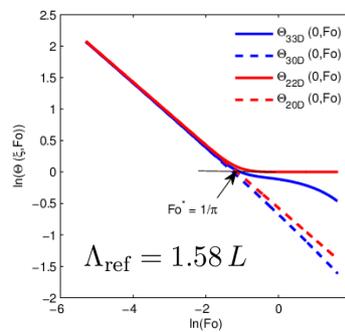
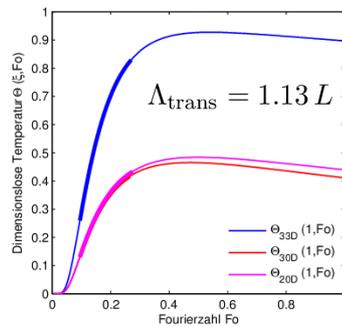
Einführung eines Kriteriums für Homogenität



Homogenitätskriterium nach J.F. Kerrisk (1971):

$$\Lambda \geq L \gg l \quad \text{mit} \quad \Lambda = \sqrt{\frac{4}{5} \pi^2 a t}$$

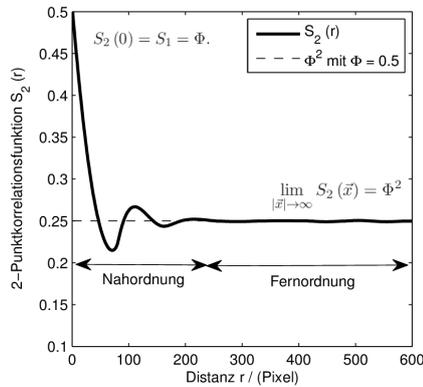
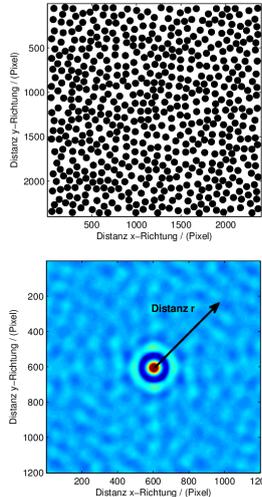
Berechnung der **charakteristischen Wellenlänge** Λ bei der Pulsthermographie:





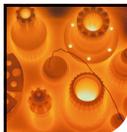
Statistische Beschreibung

n-Punktkorrelationsfunktionen



Nahordnung:
- Mikroskopische Kenngrößen: Durchmesser, Abstand, ...

Fernordnung:
- Aussage über statistische Homogenität



Effektiv-Medium Theorie (EMT)

Maxwell-Garnett Approximation (MG)



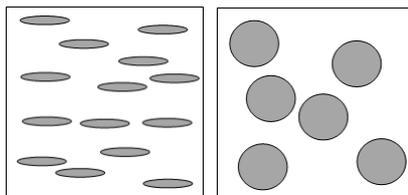
MG – Approximation für ellipsoide Einschlüsse

$$(1 - \Phi) (\lambda_m - \lambda_{\text{eff}}) + \Phi \frac{\lambda_p - \lambda_{\text{eff}}}{1 + \eta \frac{\lambda_p - \lambda_m}{\lambda_m}} = 0$$

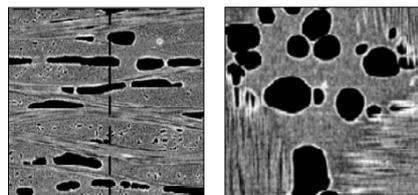
Effektive Wärmeleitfähigkeit

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_m + \Phi (\lambda_p - \lambda_m) \frac{\lambda_m}{\lambda_m + \eta (\lambda_p - \lambda_m) + \Phi \eta (\lambda_m - \lambda_p)}$$

Modellvorstellung



Poröses CFK





Effektiv-Medium Theorie (EMT)

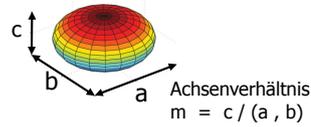
Bestimmung des Entthermalisierungsfaktors



Analogiebetrachtung

Elektrizitätslehre und **Wärmelehre**

$$D = \epsilon E = -\epsilon \nabla \phi \qquad \dot{q} = -\lambda \nabla T$$

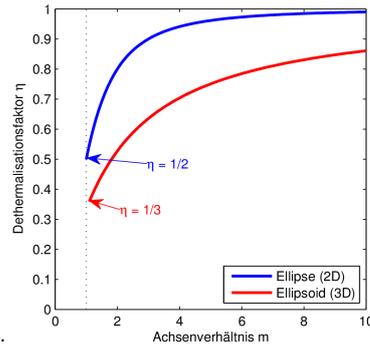


1. Fall: abgeplattetes Rotationsellipsoid: $a = b$

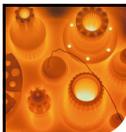
$$\eta = \frac{m^2}{m^2 - 1} - \frac{m^2}{(m^2 - 1)^{3/2}} \arcsin \left(\frac{(m^2 - 1)^{1/2}}{m} \right)$$

2. Fall: abgeplattete Ellipse: $a \rightarrow \infty$

$$\eta = \frac{m}{m + 1}$$

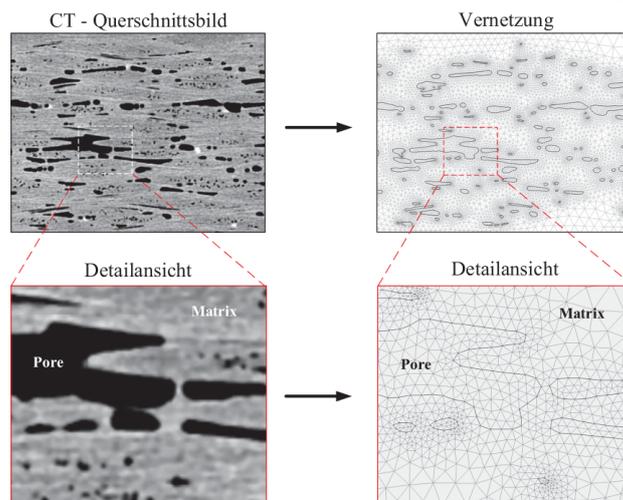


Quelle: J.A. Osborn, Phys. Rev. 67(11 & 12), pp. 351-357 (1945).



Finite Elemente Methode (FEM)

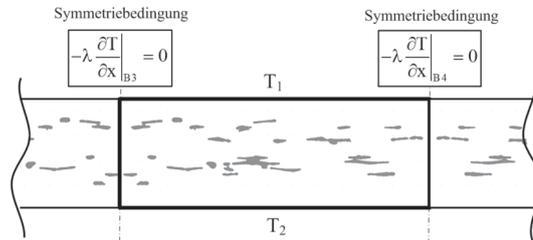
Reale Strukturen aus der Röntgen-Computertomographie





Finite Elemente Methode

Stationäre Wärmeleitungsgleichung

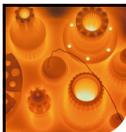


Laplace'sche Differentialgleichung:

$$0 = \nabla (\lambda(x, y) \nabla T(x, y))$$

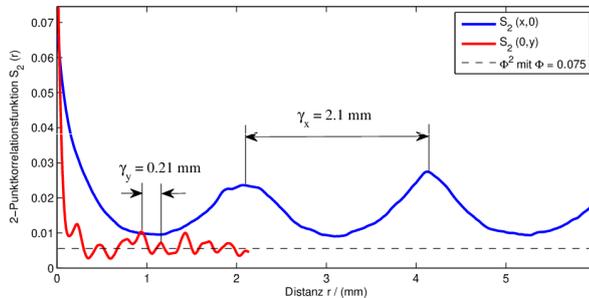
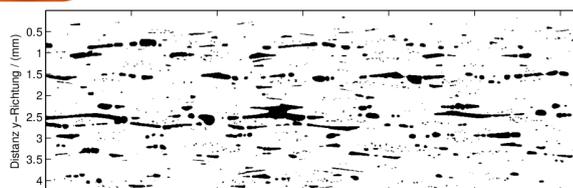
Berechnung der effektiven Wärmeleitfähigkeit:

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{\langle \dot{q} \rangle L}{T_s}, \quad \text{mit} \quad \langle \dot{q} \rangle = \frac{1}{l_c} \int_{x=0}^{l_c} \dot{q}_n(x, y) dx,$$



Ergebnisse

Verifikation des quasistationären Prinzips



Transmissionsmodus:

$$\Lambda_{\text{trans}} = 1,13 \cdot L = 1,13 \cdot 4,2 \text{ mm} = 4,8 \text{ mm}$$

$$\frac{\Lambda_{\text{trans}}}{\gamma_y} = \frac{4,8 \text{ mm}}{0,21 \text{ mm}} = 23$$

Reflektionsmodus:

$$\Lambda_{\text{trans}} = 1,58 \cdot L = 1,58 \cdot 4,2 \text{ mm} = 6,63 \text{ mm}$$

$$\frac{\Lambda_{\text{trans}}}{\gamma_y} = \frac{6,63 \text{ mm}}{0,21 \text{ mm}} = 32$$

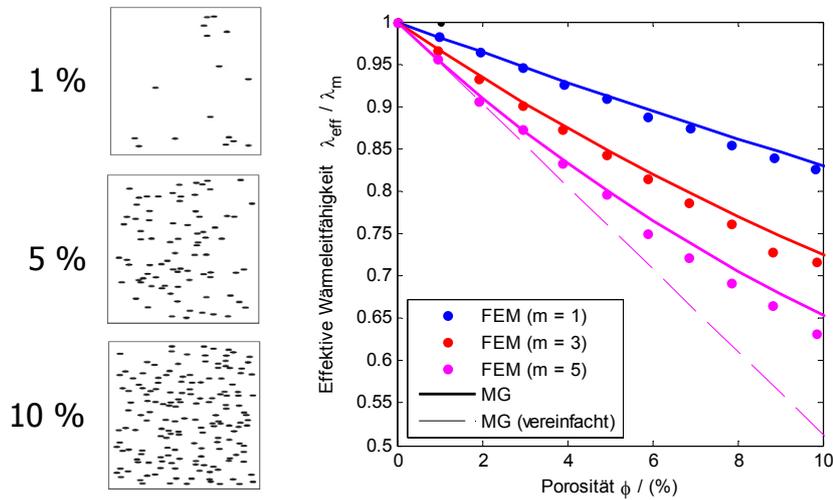
J.F. Kerrisk (1971)
100 - 1000

H.J. Lee und R.E. Taylor (1976)
4 - 12



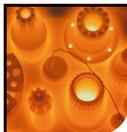
Ergebnisse

Verifikation mit idealisierten Teststrukturen



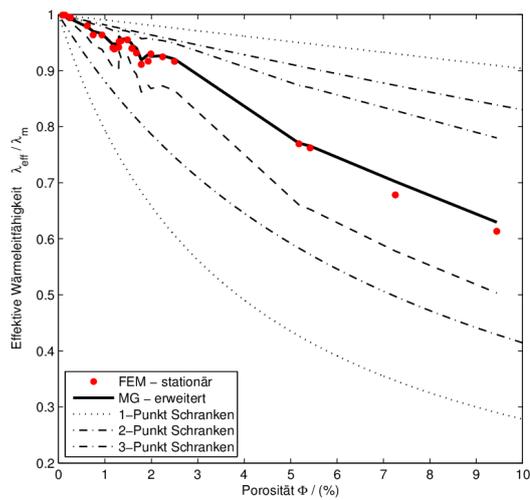
FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH • Hagenberg • Linz • Steyr • Wels

slide 15



Ergebnisse

Vergleich von Maxwell-Garnett (MG) und FEM



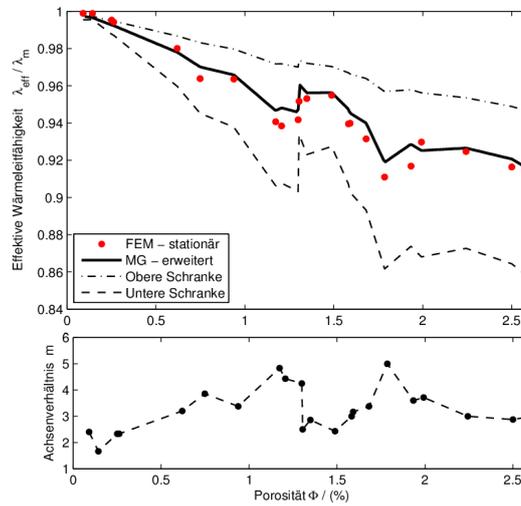
FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH • Hagenberg • Linz • Steyr • Wels

slide 16



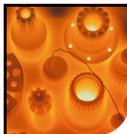
Ergebnisse

Vergleich von Maxwell-Garnett (MG) und FEM



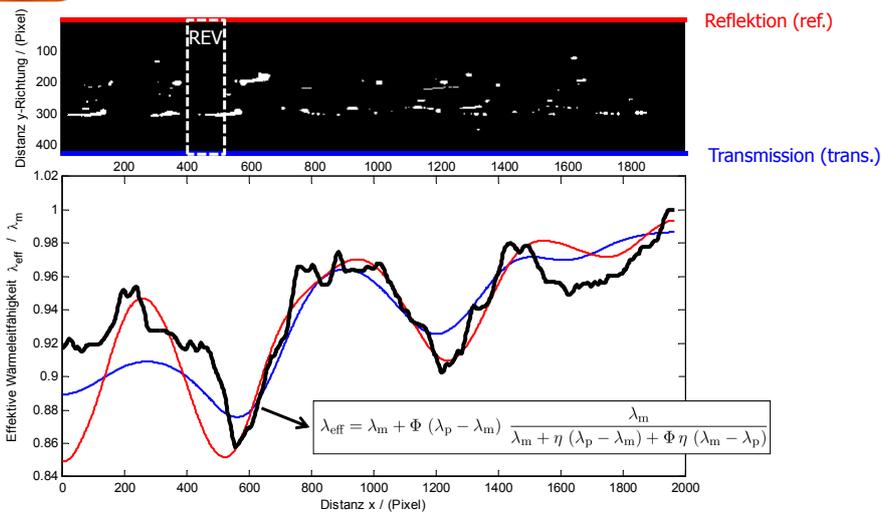
FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH • Hagenberg • Linz • Steyr • Wels

slide 17



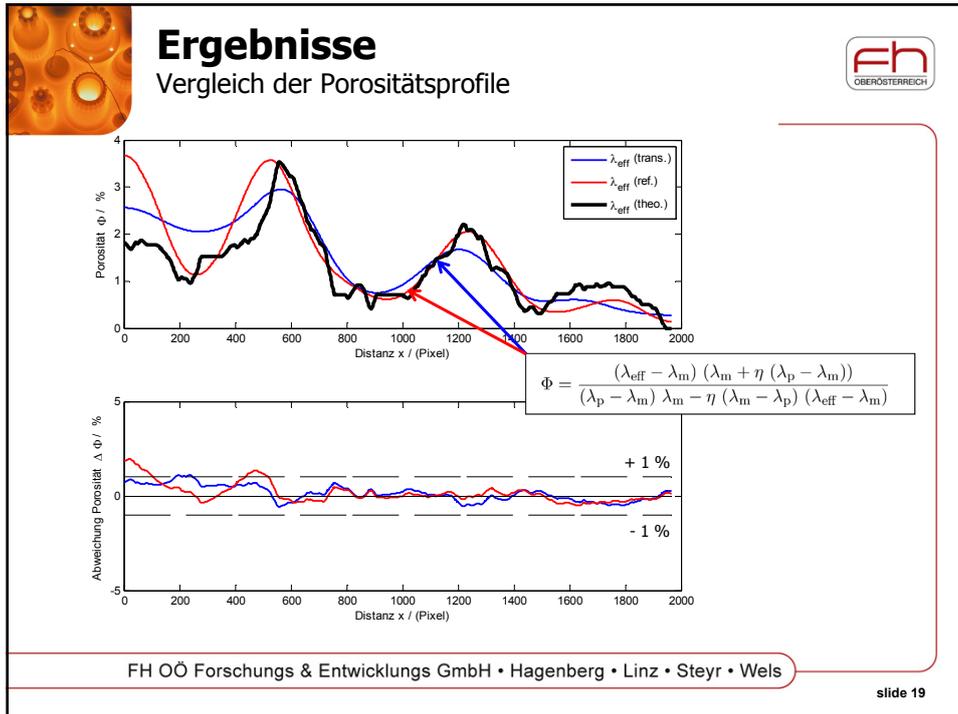
Ergebnisse

Vergleich der Wärmeleitfähigkeitsprofile von MG und FEM



FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH • Hagenberg • Linz • Steyr • Wels

slide 18



- ## Zusammenfassung
- 
- Die **Homogenisierung** des komplexen heterogenen Materials führt zu einem vereinfachten Wärmeleitungsmodell mit effektiven Größen.
 - Die **quasistationäre Betrachtungsweise** ist zulässig, da die thermische Wellenlänge groß gegenüber dem Porenabstand ist.
 - Die **Mikrostrukturcharakterisierung** von porösem CFK erfolgte mittels **CT Messungen** und der **2-Punktkorrelationsfunktion**.
 - Die **Modellierung** der **Wärmeleitung** in einem 2-Phasensystem wurde mit der **Maxwell-Garnett Approximation** und dem mittleren **Achsenverhältnis** der Poren durchgeführt.
 - Die **Verifikation** der **Maxwell-Garnett Approximation** erfolgte durch numerische Simulation mittels der **FEM**.
- FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH • Hagenberg • Linz • Steyr • Wels
- slide 20



Danksagung



FFG

finanziert durch das Programm TAKE OFF, eine Initiative des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie.

FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH • Hagenberg • Linz • Steyr • Wels

slide 21