

Quantitätsverfahren bei Porositätsbestimmung in kohlefaserverstärkten Verbundwerkstoffen



G. Hendorfer, G. Mayr, K.-H. Gresslehner, J. Suchan

Fakultät für Technik und Umweltwissenschaften, FH OÖ



FH OÖ Standort - Kompetenzen



Über 40 Studiengänge an 4 Fakultäten



Fakultäten der FH Oberösterreich

Informatik
Kommunikation
Medien

Campus HAGENBERG

Gesundheit
Soziales

Campus LINZ

Management

Campus STEYR

Technik
Umweltwissen-
schaften


Campus WELS

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



Studienangebot Wels 2013/14



STUDIENANGEBOT ENGINEERING				Forschung & Wirtschaft
Klassische Ingenieurwissenschaften	Umwelt & Energie	Bau & Ökologie	Wirtschaftsingenieurwissenschaften	
Automatisierungstechnik BSc + MSc	Bio- und Umwelttechnik BSc + MSc	Bauingenieurwesen BSc	Mechatronik / Wirtschaft BSc + MSc	Research Center -Forschungszentren
Maschinenbau BSc + MSc	Lebensmitteltechnologie & Ernährung BSc		Innovation & Product Management BSc + MSc 	Transferzentrum -Industriekooperation -Sprint>lab -Innovationsschecks
Metall und Kunststofftechnik BSc + MSc	Öko Energietechnik BSc + MSc		Produktdesign & Techn. Kommunikation BSc	Weiterbildung -§ 9 Lehrgänge / Seminare -Summer School
Anlagenbau MSc	Verfahrenstechnische Produktion BSc			Gründungszentrum -Inkubator -Gründungsberatung



Forschungsschwerpunkte



Automatisierungstechnik & Simulation



Mess- & Prüftechnik



Werkstoff- & Produktionstechnik



NEU

Innovations- & Technologie-Management



NEU

Biotreibstoff- & Lebensmitteltechnologie



Energie- & Umwelttechnik



Nondestructive Testing

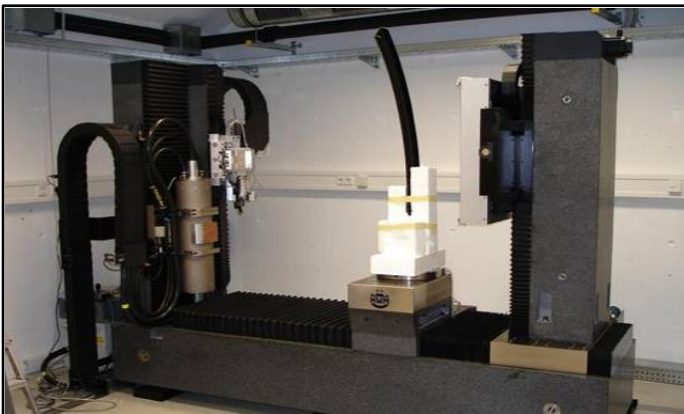
Upper Austrian University of Applied Sciences



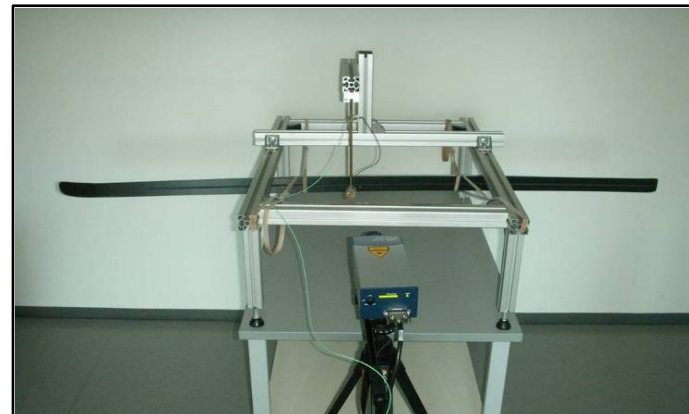
Active Thermography



Shearography



3D Computer Tomography



Modal Analysis



Delamination in a wood-plastic composite (WPC) panel

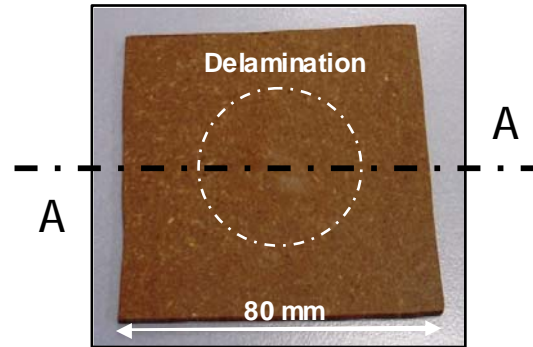


Components:

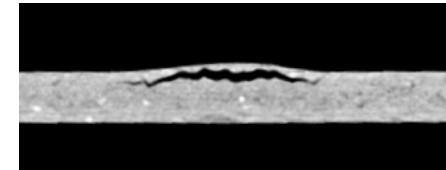
wood flour + melamine resin

Applications:

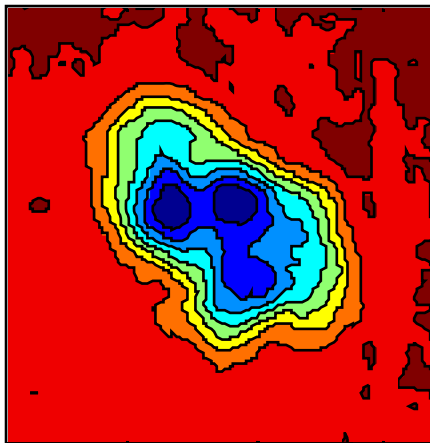
automobile industry
furniture industry



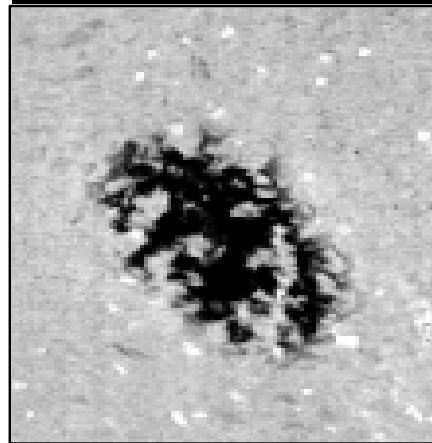
Section A-A



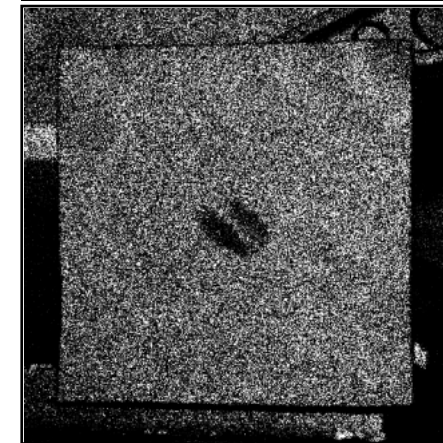
Active Thermography



Computed Tomography

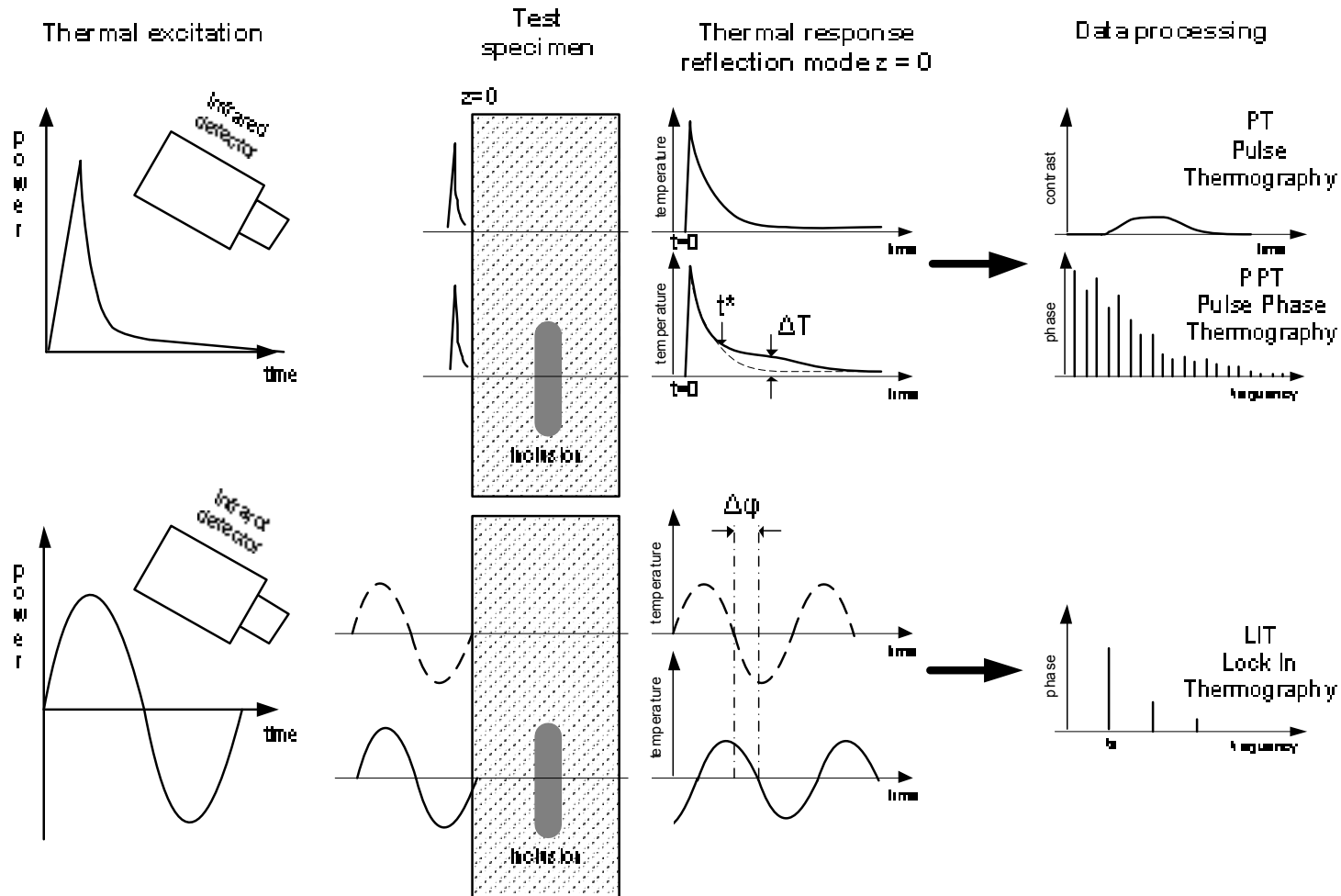


Digital Shearography





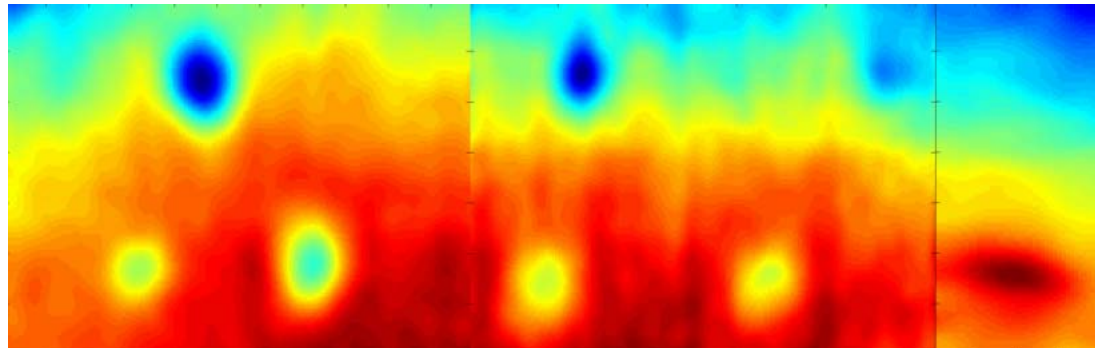
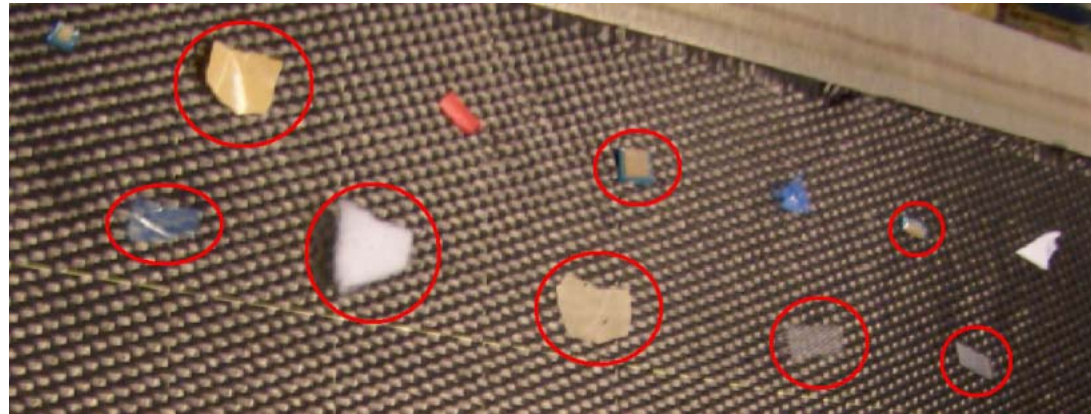
Methoden der Aktiven Thermographie: Puls und Lock-In Thermographie





Aufspüren von Fremdmaterialien

- Faserverbundwerkstoff – Platte



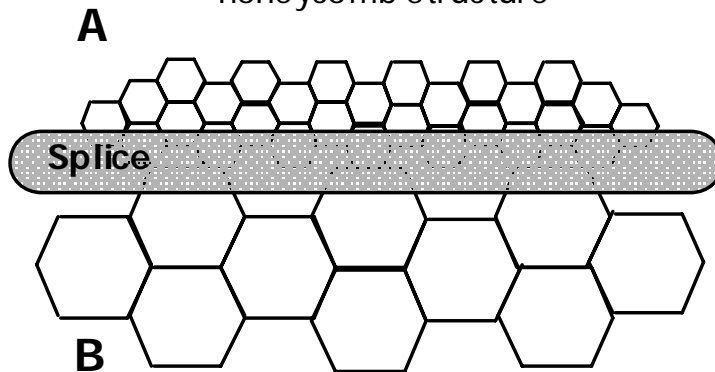


Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit zum Nachweis von Verklebungsfehler

Splice defects in honeycomb structures

Comparison: Diffusivity Imaging and X-Ray Tomography

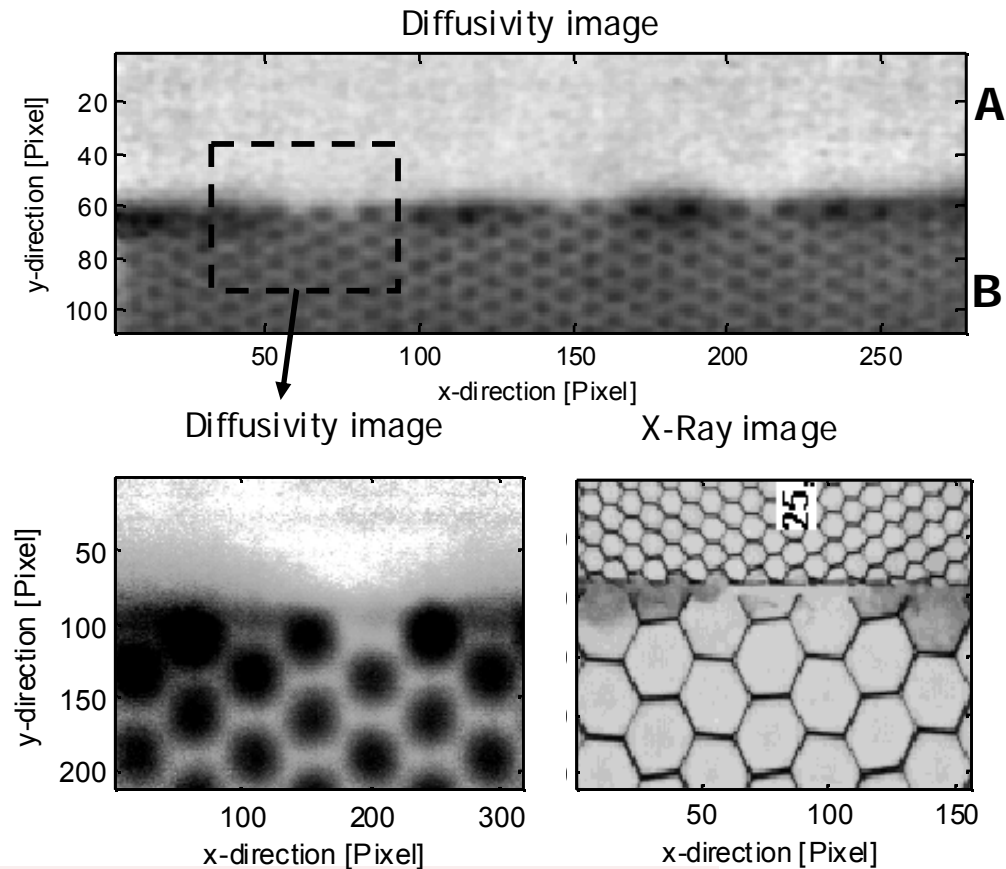
Cross-section of the honeycomb structure



New composite components of aircrafts:

Bonding of honeycomb structures with different cell size

Plate thickness: 25 mm !





Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit zur Bestimmung einer Glasfaserverteilung



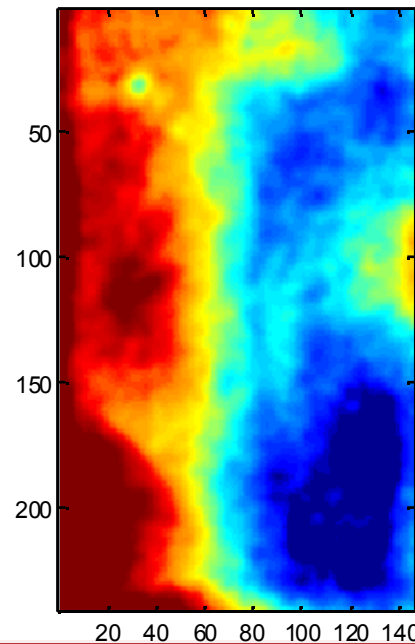
Glass fiber distribution of a car roof (Opel Zafira)

Comparison: Diffusivity Imaging and 3D-Computed Tomography

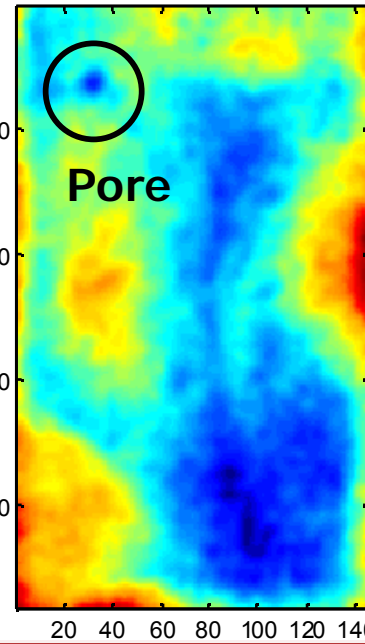
GFRP - Glass Fiber Reinforced Plastic



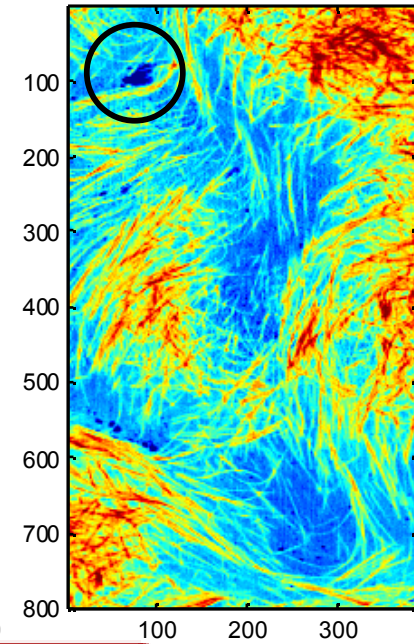
Diffusivity Image
UNCORRECTED



Diffusivity Image
CORRECTED



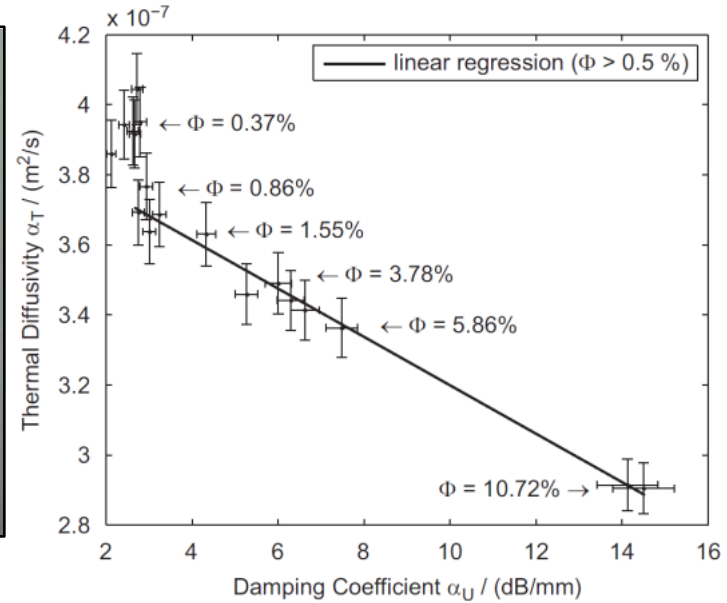
3D-Computed
Tomography
IMAGE



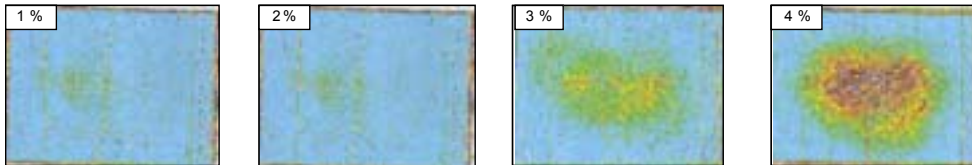


Einführung

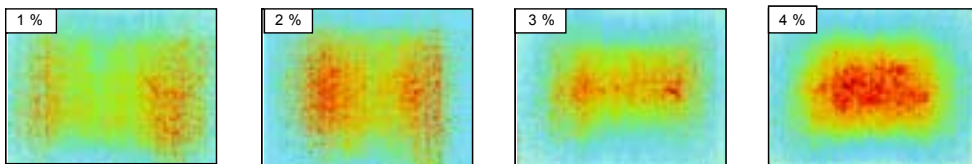
Nachweis von Porosität mit Aktiver Thermographie



Ultrasonic C-scan images



Active Thermography – Diffusivity images



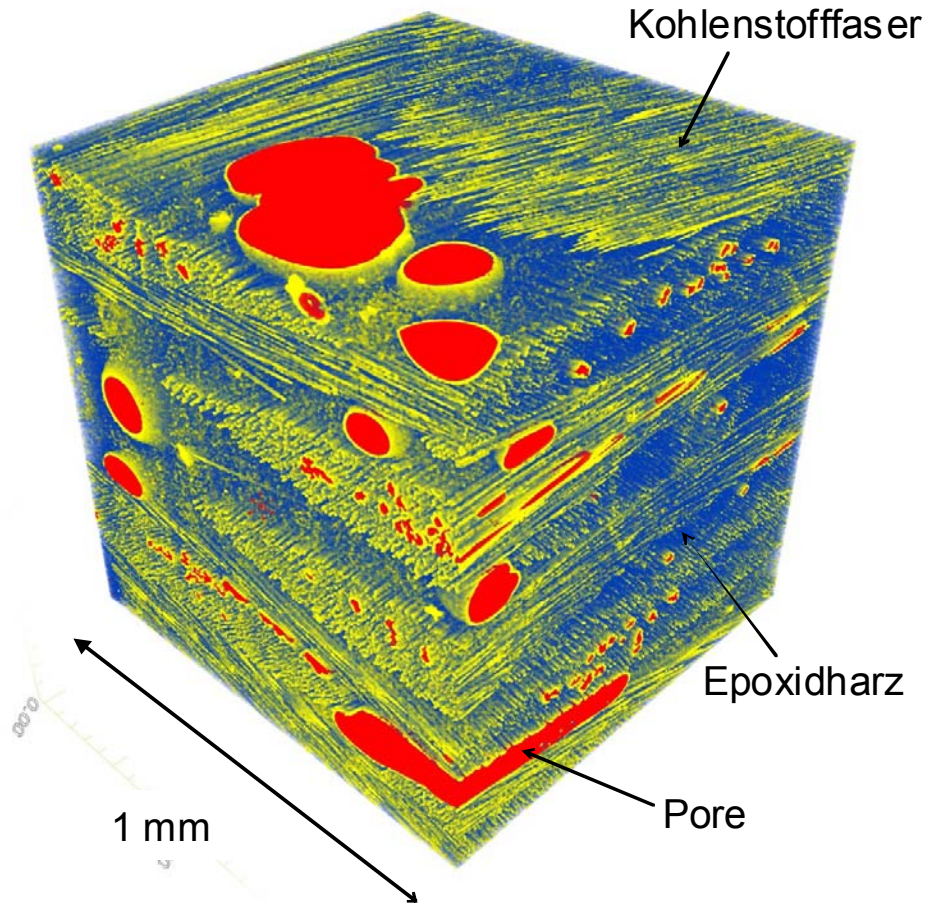
Zielsetzung

Modellbasierte Bestimmung der Porosität durch die gemessene Temperaturleitfähigkeit



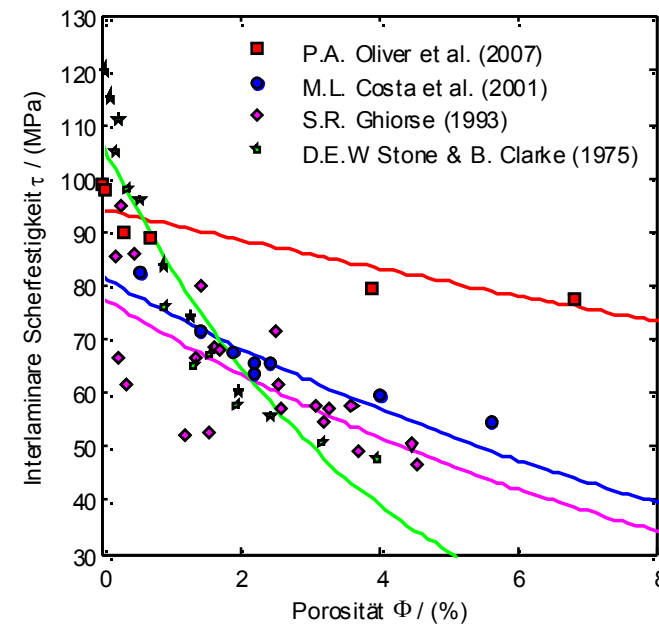
Einführung

Porosität in kohlefaserverstärkten Kunststoffen



Ursachen:

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



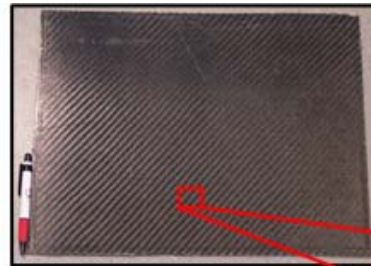


Mehrskalenanalyse

Mikro-, meso- & makroskopische Betrachtung

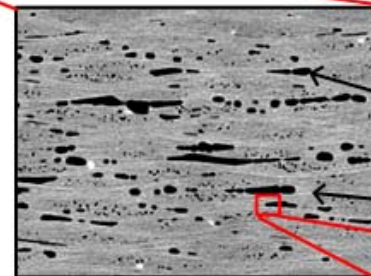
Makroskopische Ebene

L_c
(m)



Mesoskopische Ebene

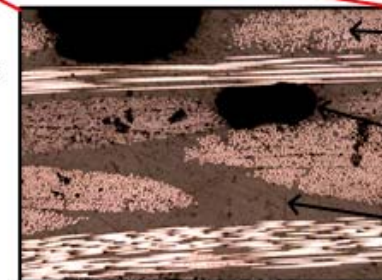
l_c
(mm)



Pore
Matrix

Mikroskopische Ebene

d
(μm)



Faser
($D = 7 \mu\text{m}$)
Pore
Epoxidharz

2. Stufe:
Homogenisierung des
Zweiphasen-Materials

1. Stufe:
Homogenisierung der
Kohlefaser -
Epoxidharzmatrix

Voraussetzung ist
eine eindeutige
Skalentrennung:

$$L_c \gg l_c \gg d$$



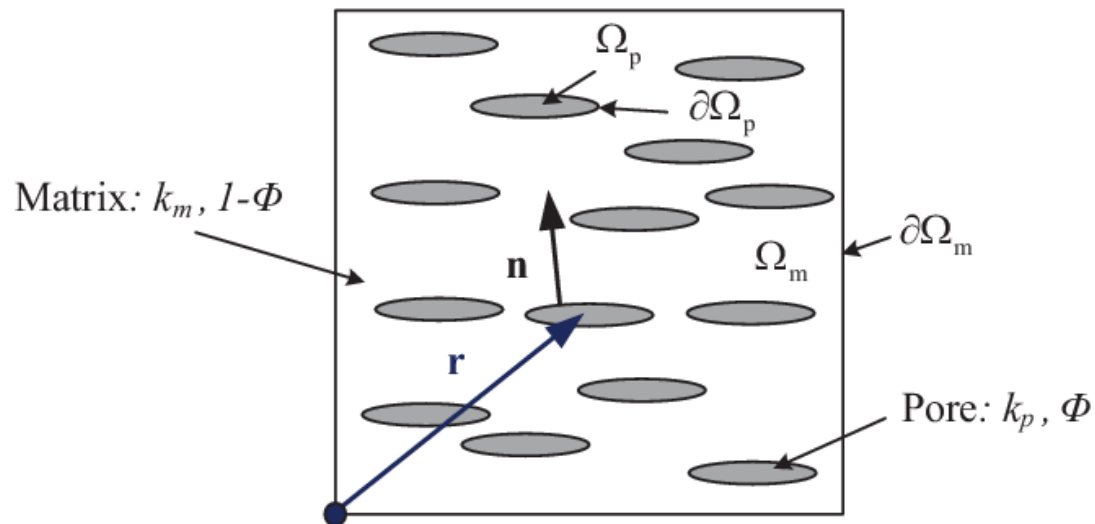
Wärmeleitung - mesoskopisch

Heterogenes Material mit zwei Phasen



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

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

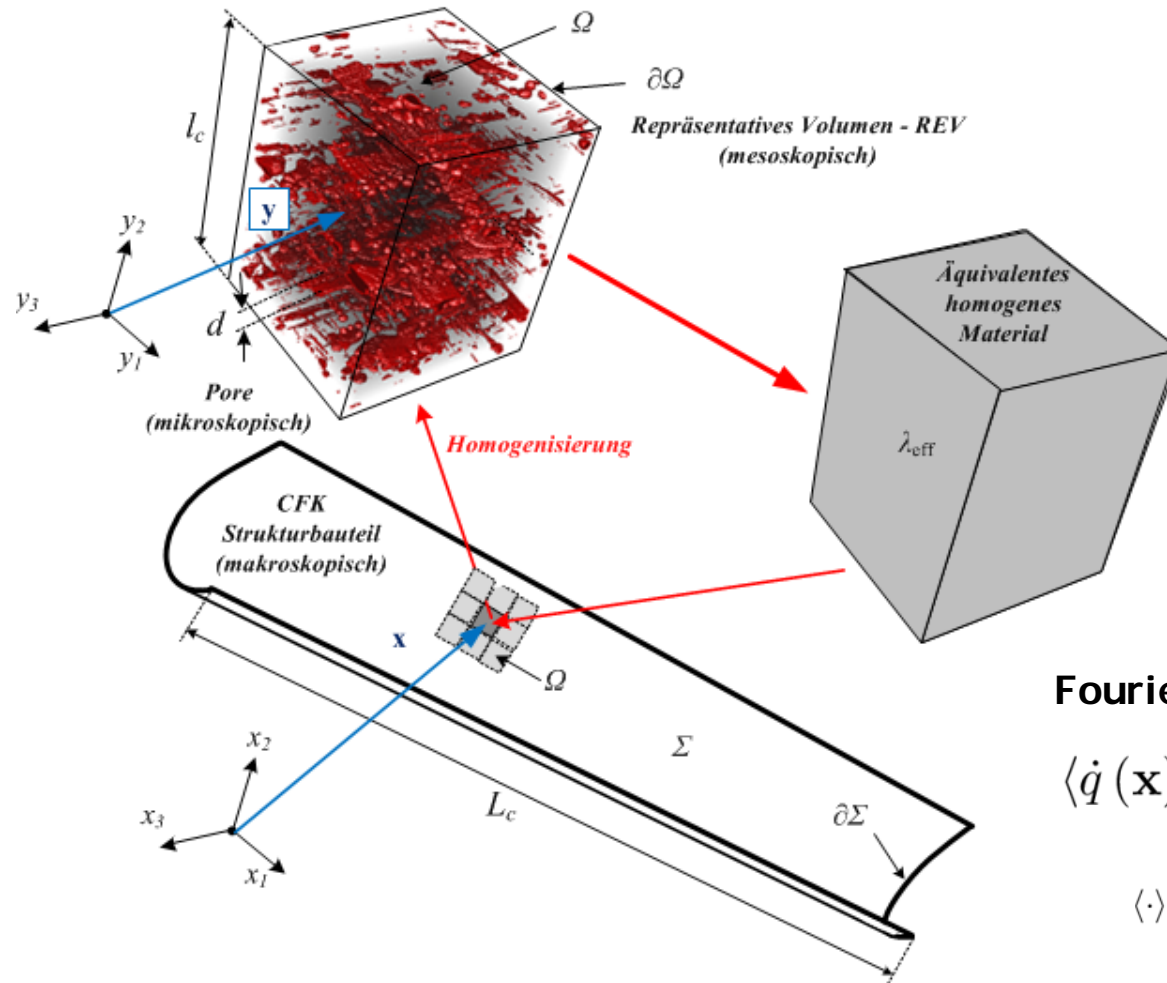


Interne Randbedingungen: $T_m = T_p$ und $\mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{q}}_m = \mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{q}}_p$ auf $\partial\Omega_p$



Homogenisierung

Repräsentatives Elementarvolumen - REV



\mathbf{x} ... makroskopisches Koordinatensystem
 \mathbf{y} ... mesoskopisches Koordinatensystem

Fourier'sches Wärmeleitgesetz

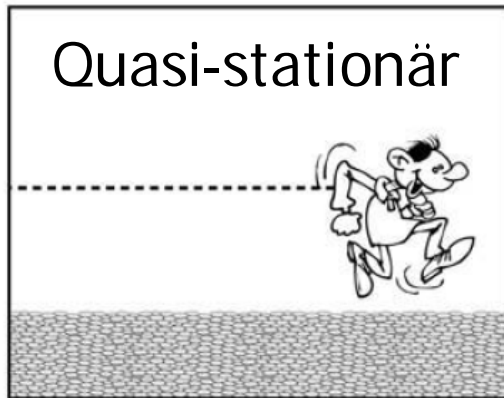
$$\langle \dot{q}(\mathbf{x}) \rangle = -\lambda_{eff}(\mathbf{x}) \langle \nabla T_0(\mathbf{x}) \rangle$$

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

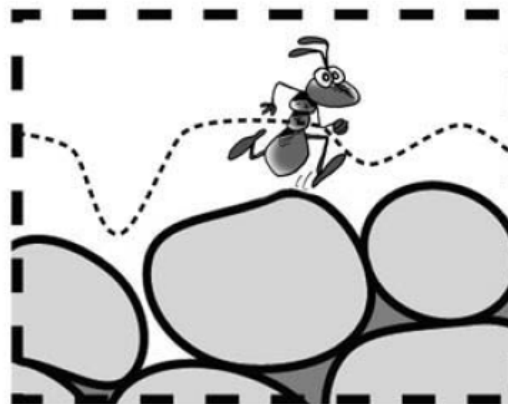
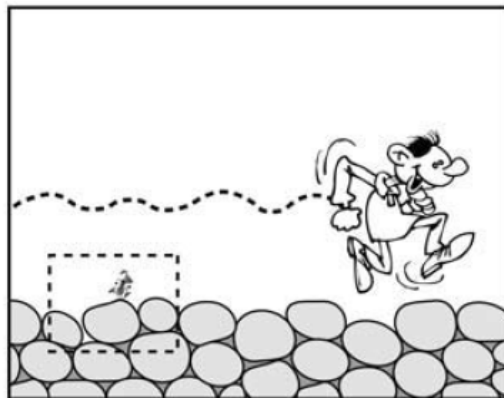


Quasistationäre Betrachtung

Abhängigkeit vom Beobachter (thermischen Welle)



Δ ... charakteristische thermische Wellenlänge



→ Instationär !

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



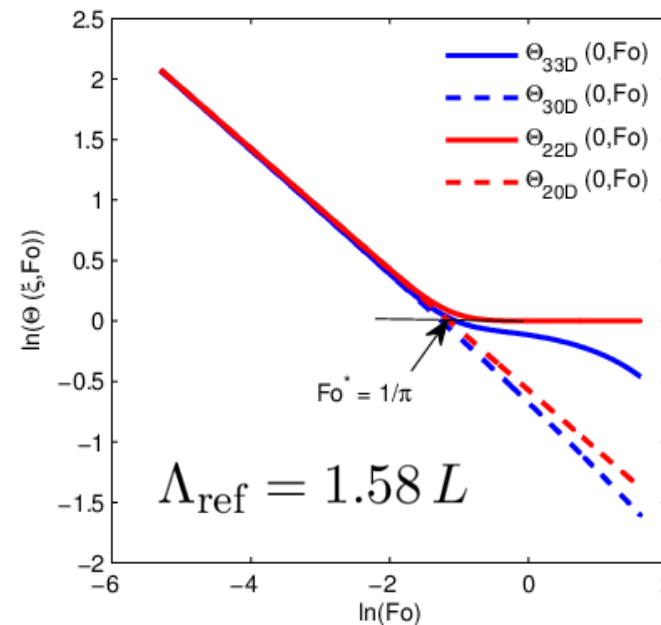
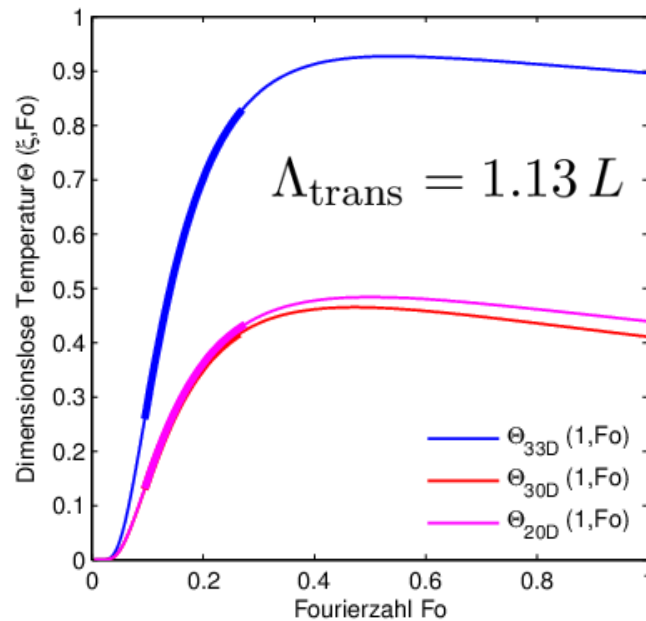
Quasistationäre Betrachtung

Einführung eines Kriteriums für Homogenität

Homogenitätskriterium nach J.F. Kerrisk (1971):

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

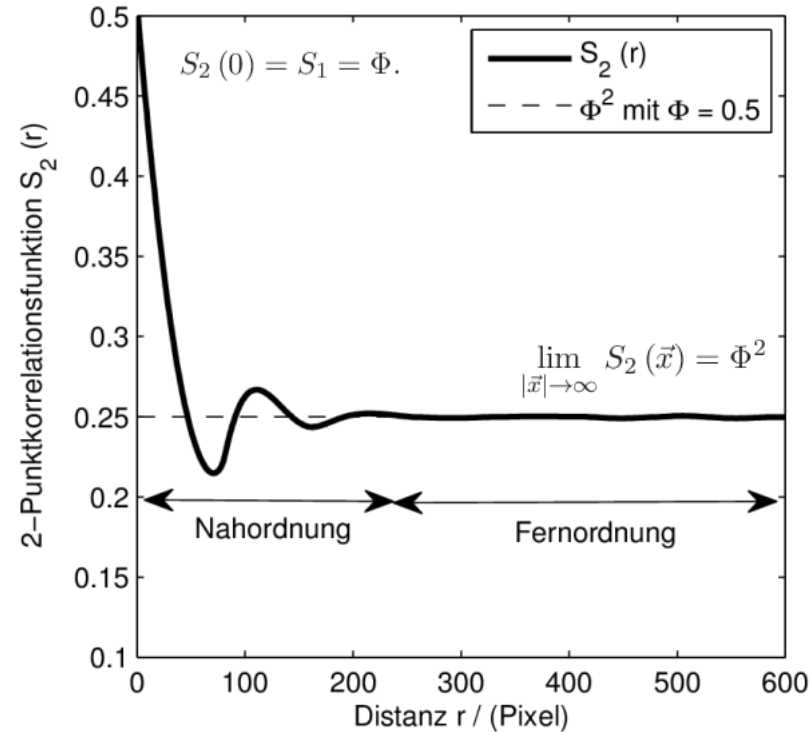
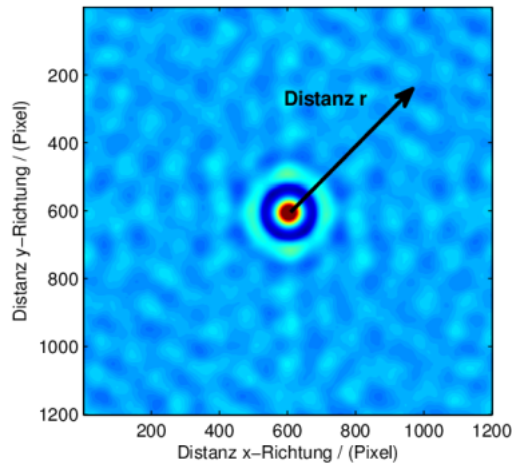
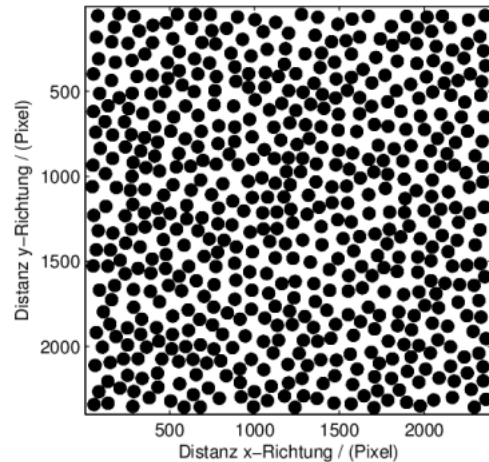
Berechnung der **charakteristischen Wellenlänge** Λ bei der Pulsthermographie:





Statistische Beschreibung

n-Punktkorrelationsfunktionen



Nahordnung:

- Mikroskopische Kenngrößen: Durchmesser, Abstand, ...

Fernordnung:

- Aussage über statistische Homogenität



Electric versus Thermal Field

φ

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} \varphi$$

$$\vec{D} = -\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{\nabla} \varphi$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = 0$$

T

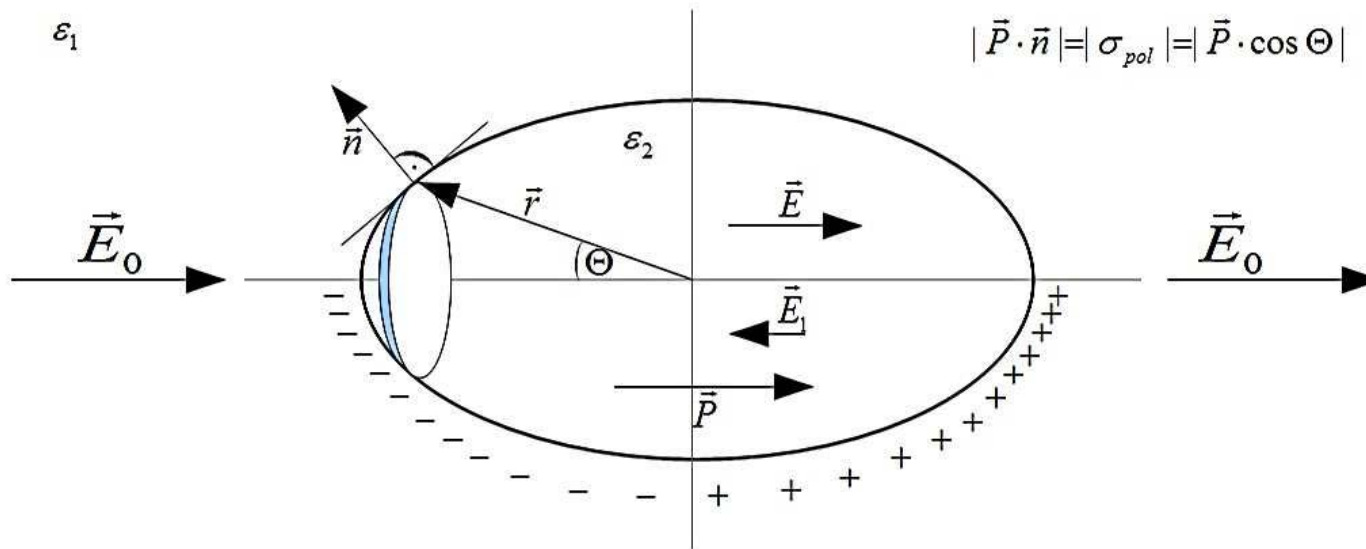
$$\vec{E} = -\vec{\nabla} T$$

$$\vec{j} = -\lambda \cdot \vec{\nabla} T$$

$$\operatorname{div} \vec{j} = -\frac{\partial(\rho \cdot c \cdot T)}{\partial t} = 0$$



Electric Field Model





Effektiv-Medium Theorie (EMT)

Maxwell-Garnett Approximation (MG)



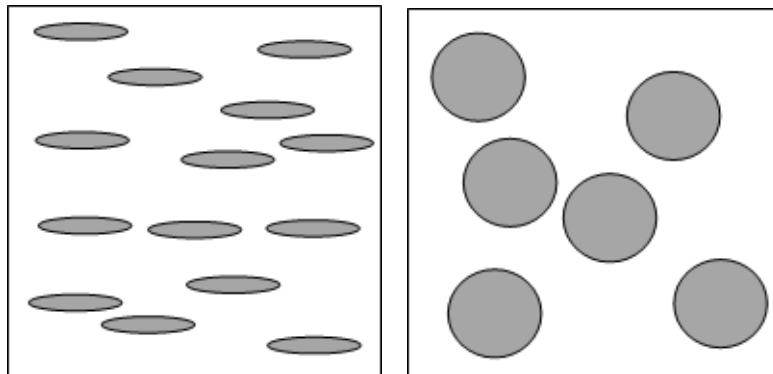
MG – Approximation für ellipsoide Einschlüsse

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

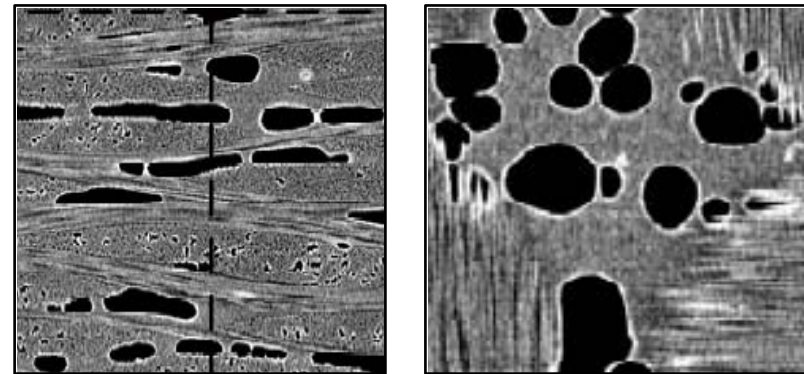
Effektive Wärmeleitfähigkeit

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

Modellvorstellung



Poröses CFK





Effektiv-Medium Theorie (EMT)

Bestimmung des Entthermalisierungsfaktors



Analogiebetrachtung

Elektrizitätslehre und Wärmelehre

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} = -\epsilon \nabla \phi$$

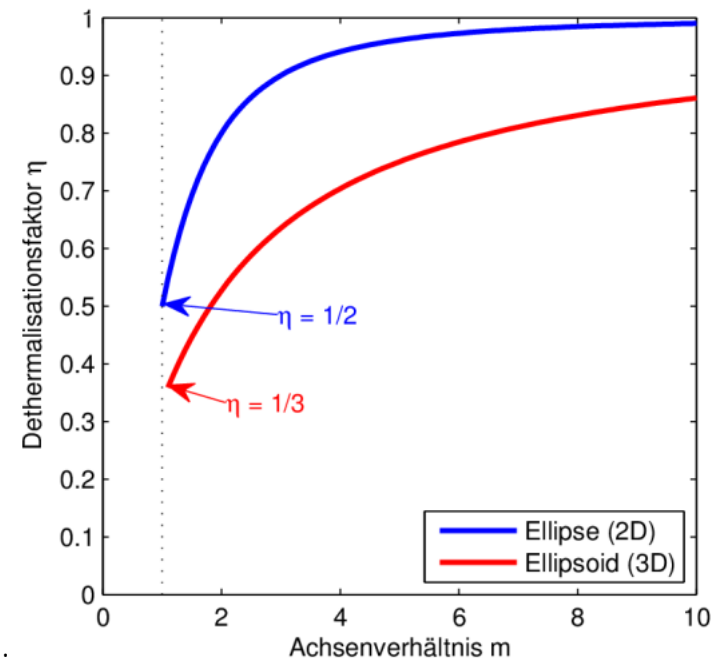
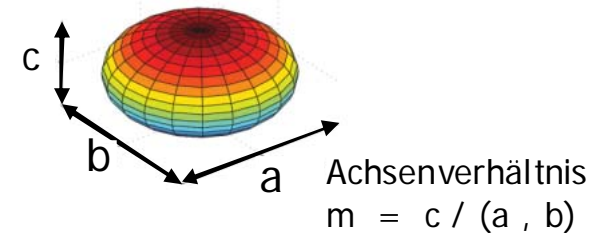
$$\dot{q} = -\lambda \nabla T$$

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: $a \rightarrow \infty$

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

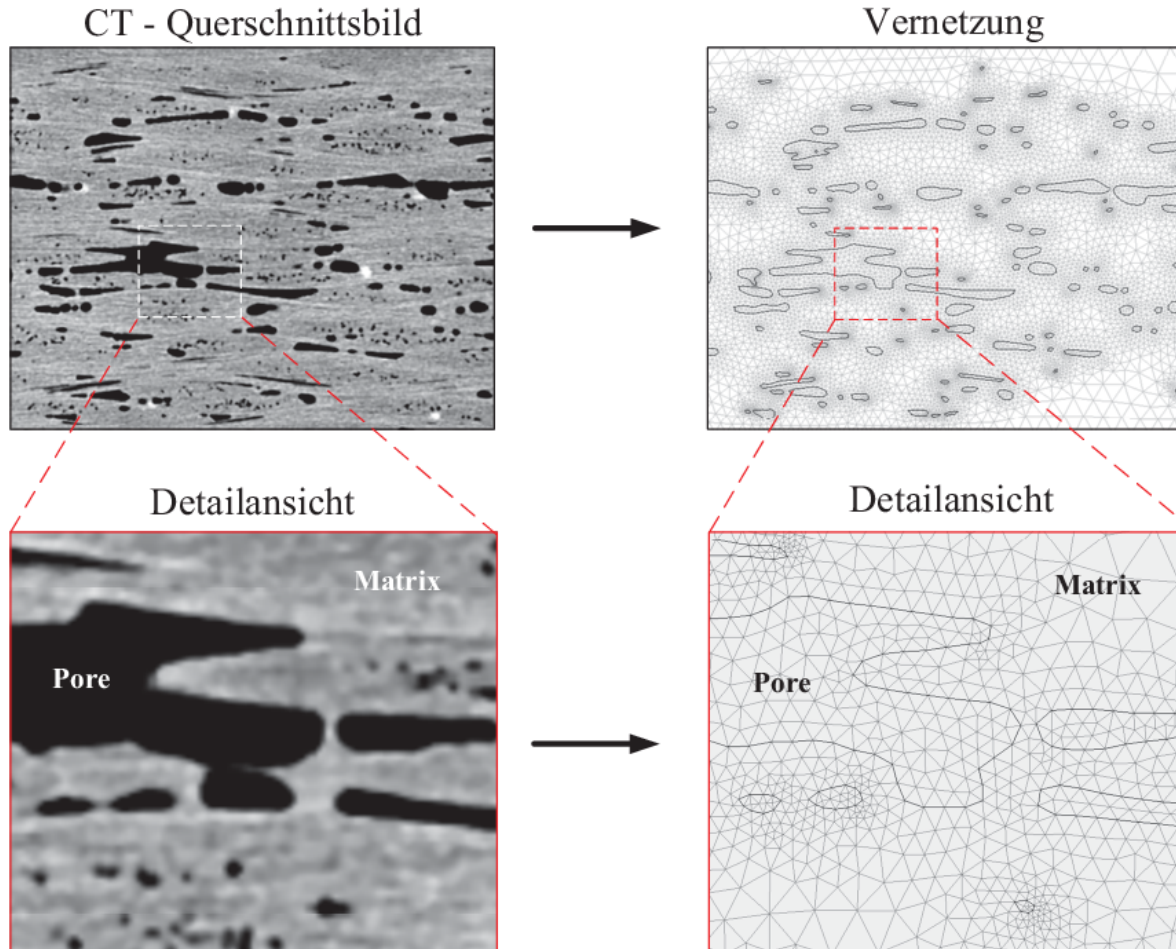


Quelle: J.A. Osborn, Phys. Rev. 67(11 & 12), pp. 351-357 (1945).



Finite Elemente Methode (FEM)

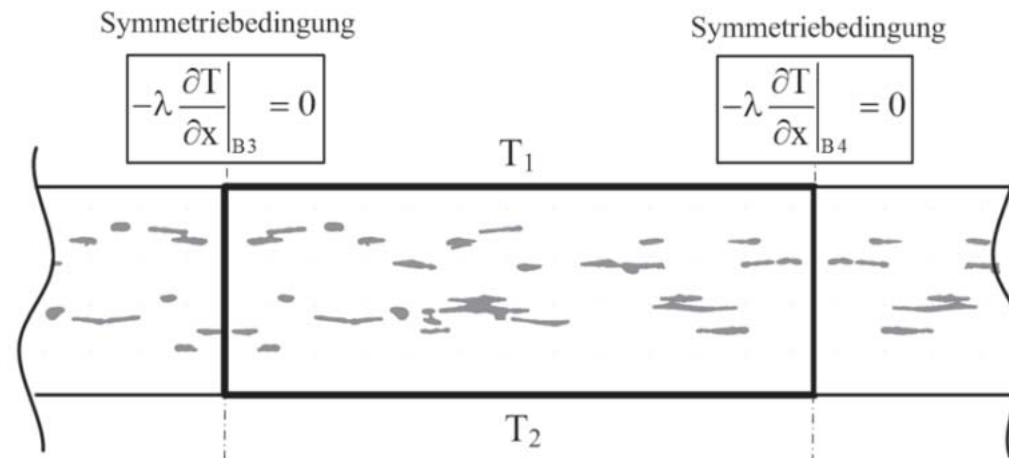
Reale Strukturen aus der Röntgen-Computertomographie





Finite Elemente Methode

Stationäre Wärmeleitungsgleichung



Laplace'sche Differentialgleichung:

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

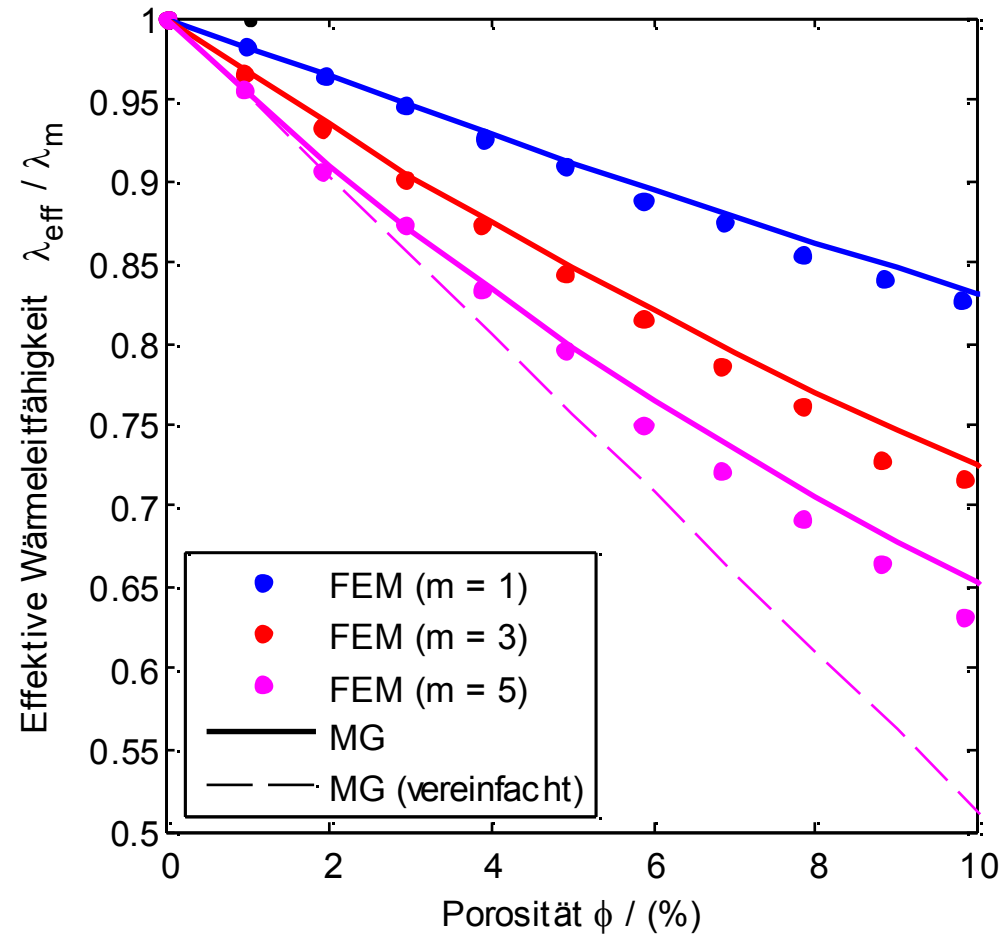
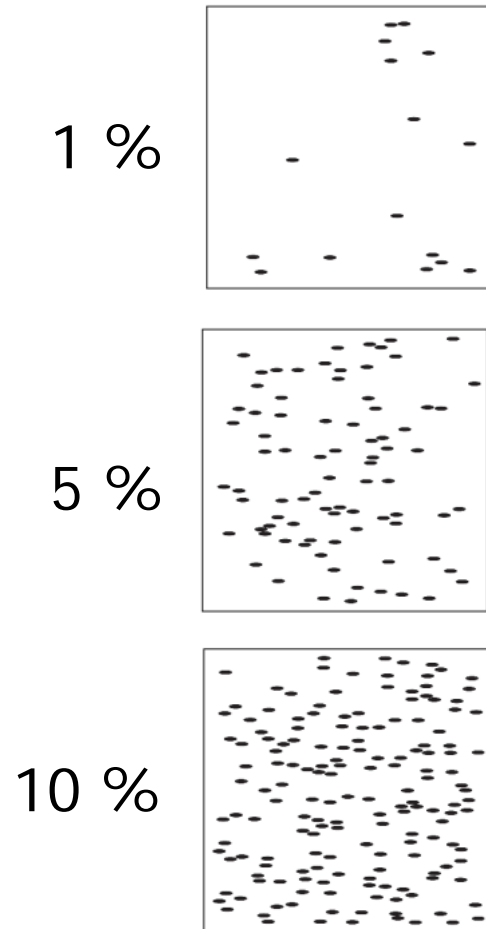
Berechnung der effektiven Wärmeleitfähigkeit:

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



Ergebnisse

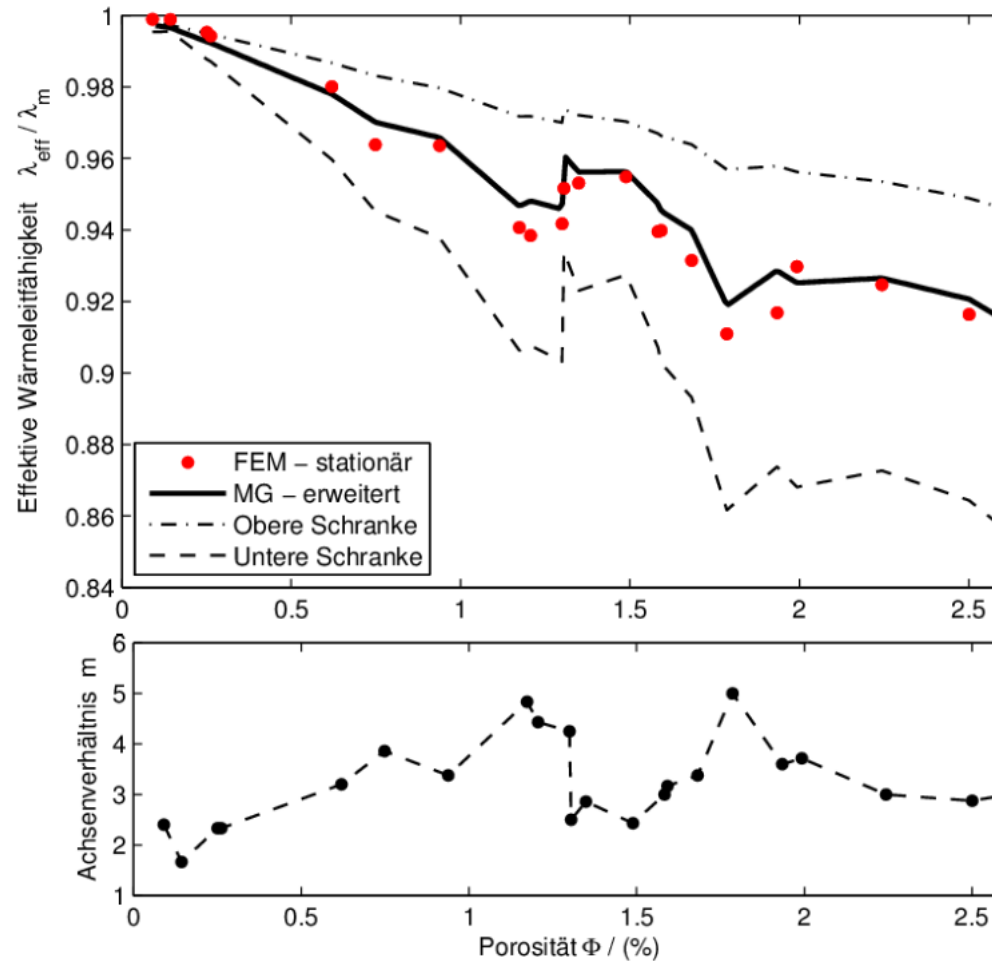
Verifikation mit idealisierten Teststrukturen





Ergebnisse

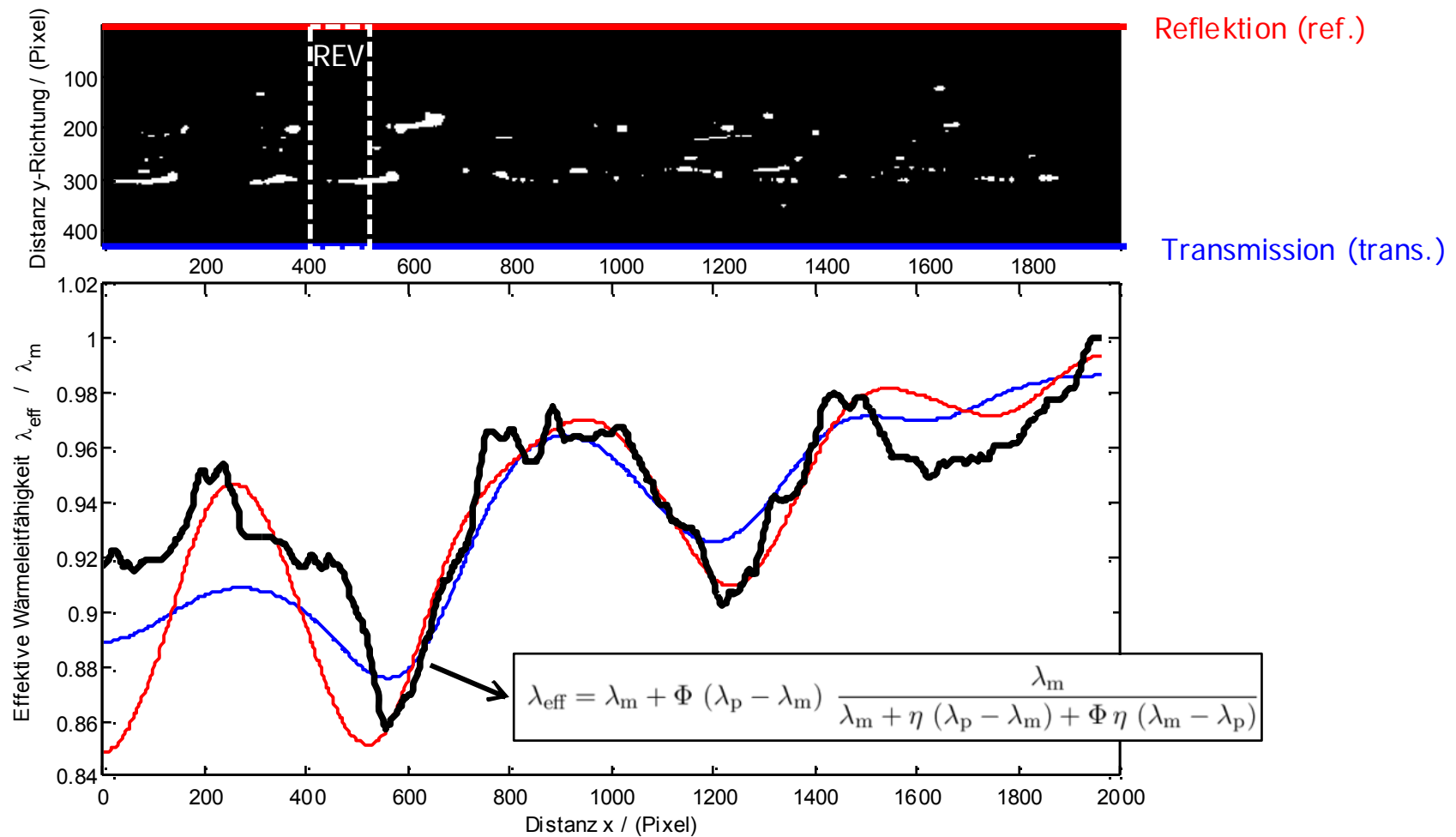
Vergleich von Maxwell-Garnett (MG) und FEM





Ergebnisse

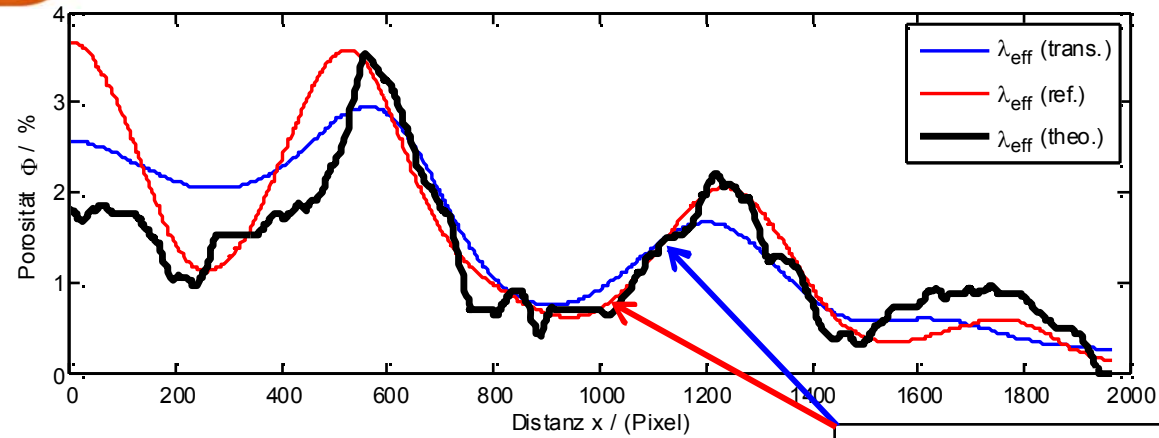
Vergleich der Wärmeleitfähigkeitsprofile von MG und FEM



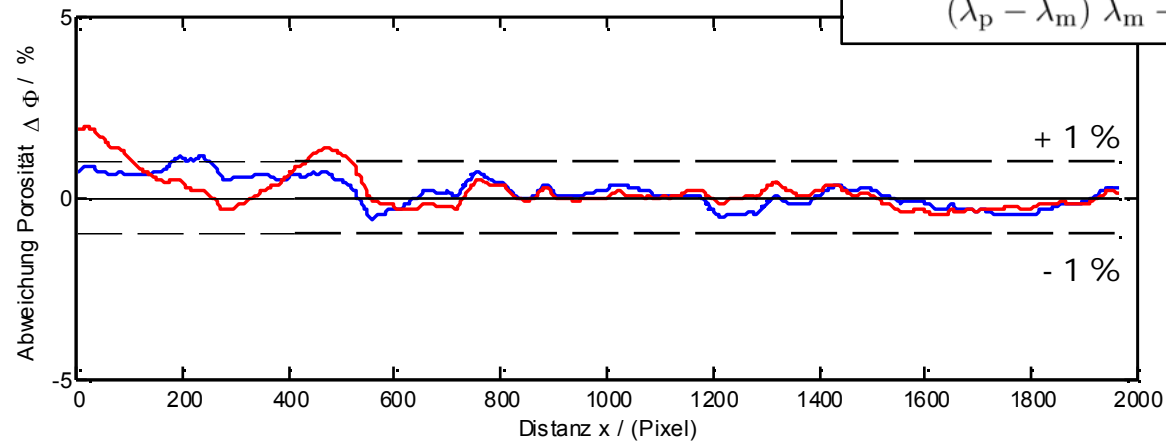


Ergebnisse

Vergleich der Porositätsprofile



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



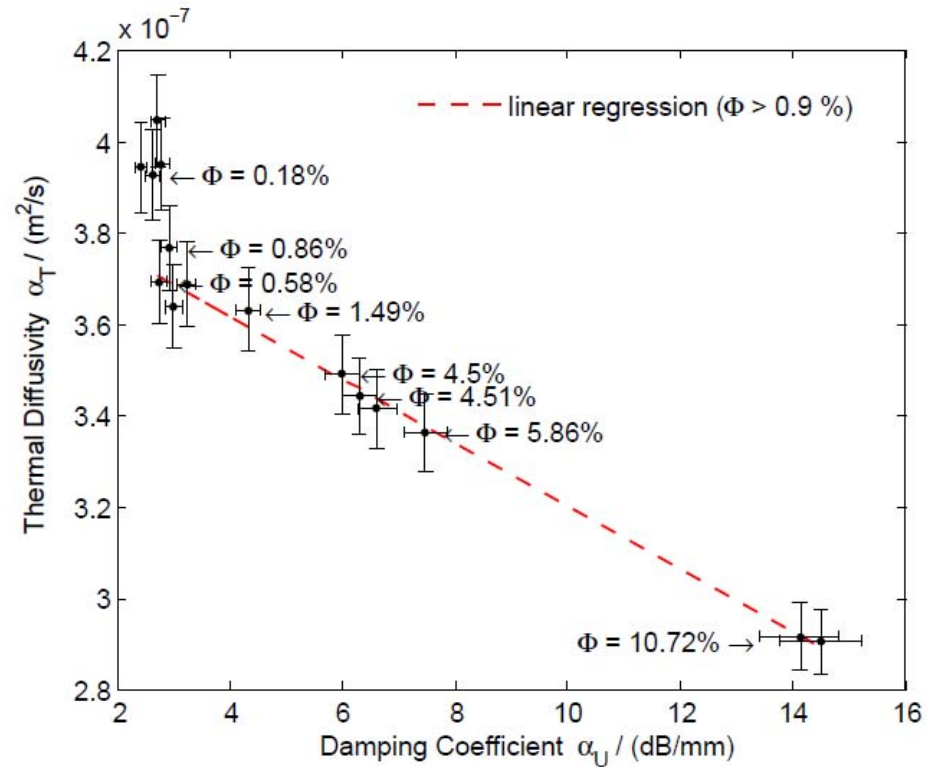


Measurement Results

Thermography vs. Ultrasonic C-Scan



Source: <http://www.facc.at>



Pulsed Thermography: FLIR Thermacam PM695 ($\Delta T = 80 \text{ mK}$, $\text{FPS} = 25$, $8 - 12 \mu\text{m}$)
Ultrasonic C-SCAN: (inspection frequency $f = 5 \text{ MHz}$, probe diameter = $0.75''$)



Measurement Errors

Pulsed Thermography versus Ultrasonic Testing



Porosity	Thermography	Ultrasonic
[%]	[%]	[%]
2	0,2 .. 3,5	0,9 ... 3,0
4	2,6 ...5,2	2,7 ... 5,2
6	4.9 ... 7.0	4,5 ... 7,4
8	7,1 ... 8,9	6,3 ... 9,5



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** und durch Vergleich von **Thermografie-** mit **Ultraschallmessungen**.



Danksagung



FFG

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