Quantitative Bestimmung von Materialeigenschaften mittels aktiver Thermografie

G. Hendorfer
Fachhochschule OÖ

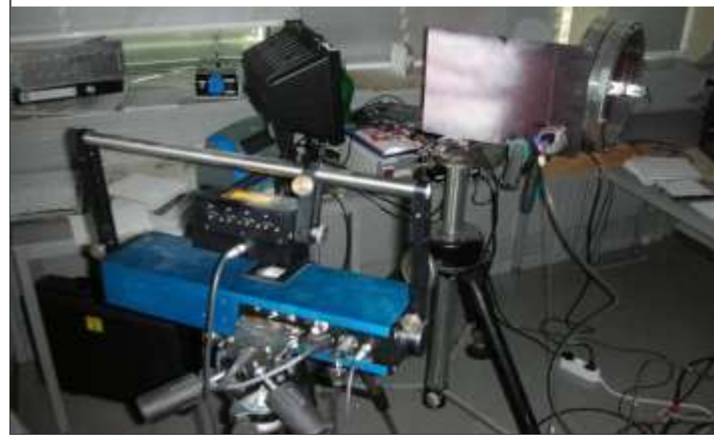
Thermografieforum Eugendorf 2018

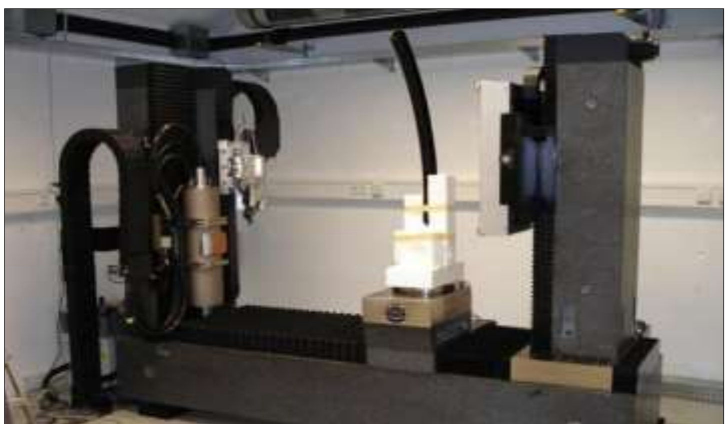
NDT-Methoden

Methoden der ZfP
an der Fachhochschule Wels

Aktive Thermografie

Shearografie



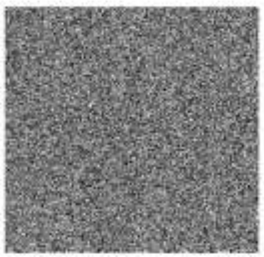


3D Computertomografie

Modalanalyse

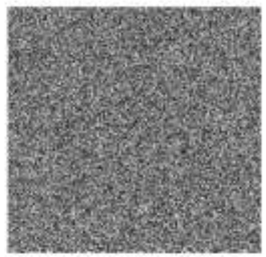
Methoden der ZfP
Laserprüfmethoden - Shearografie

unloaded



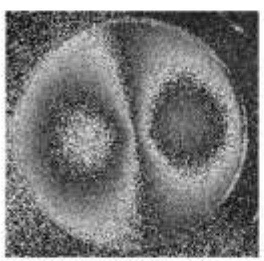
Φ

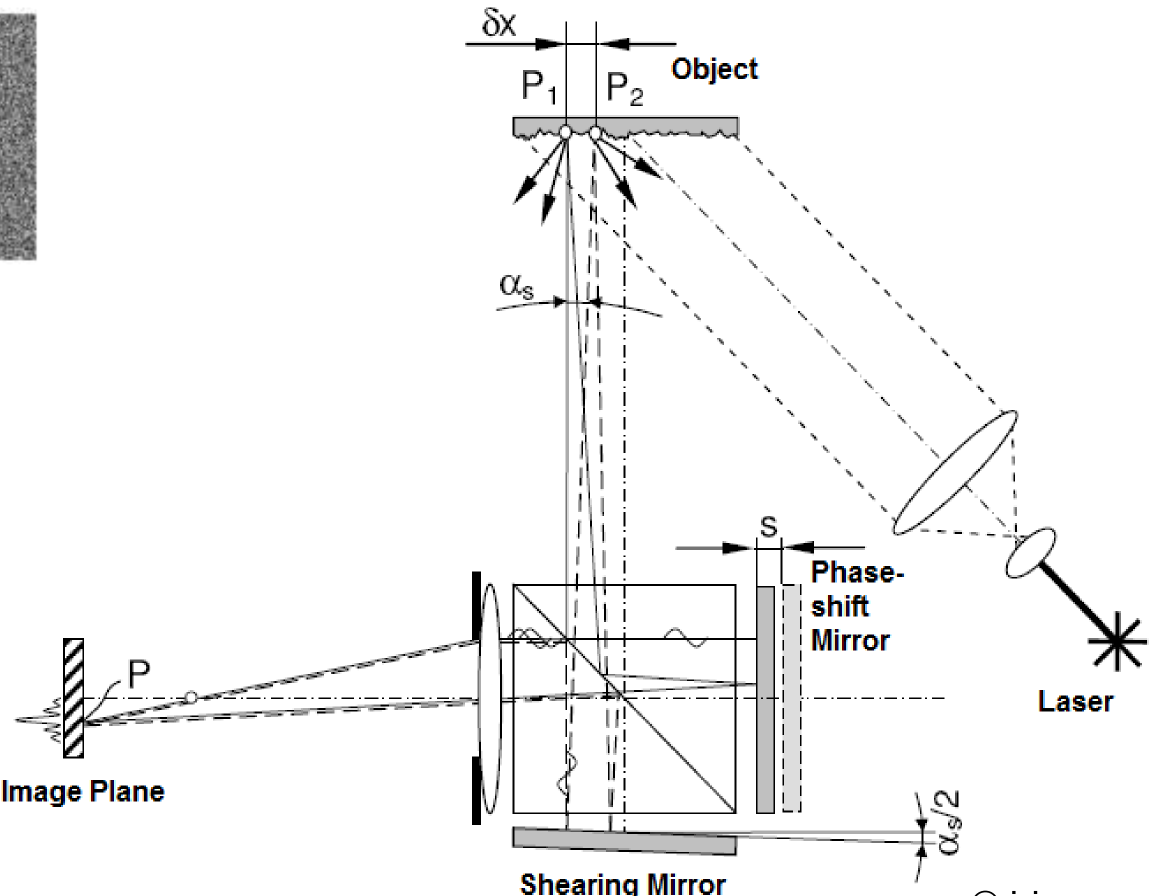
loaded



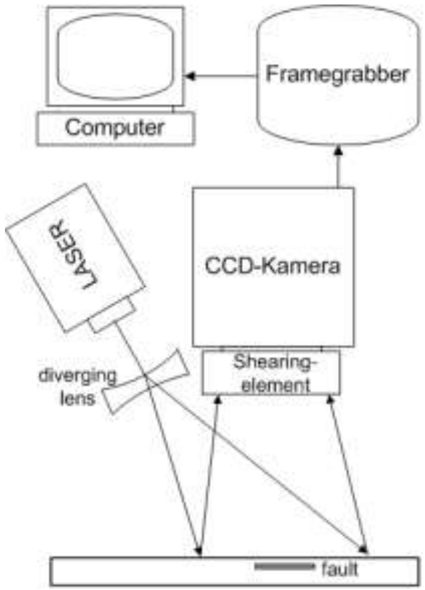
Φ‵

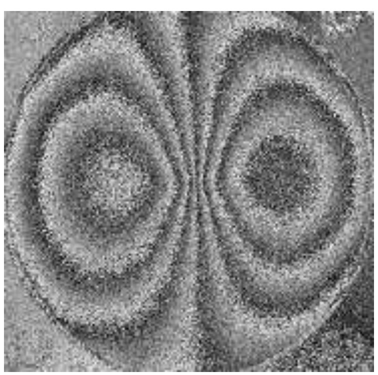
Δ = Φ - Φ‵





Methoden der ZfP
Shearografie - Equipment

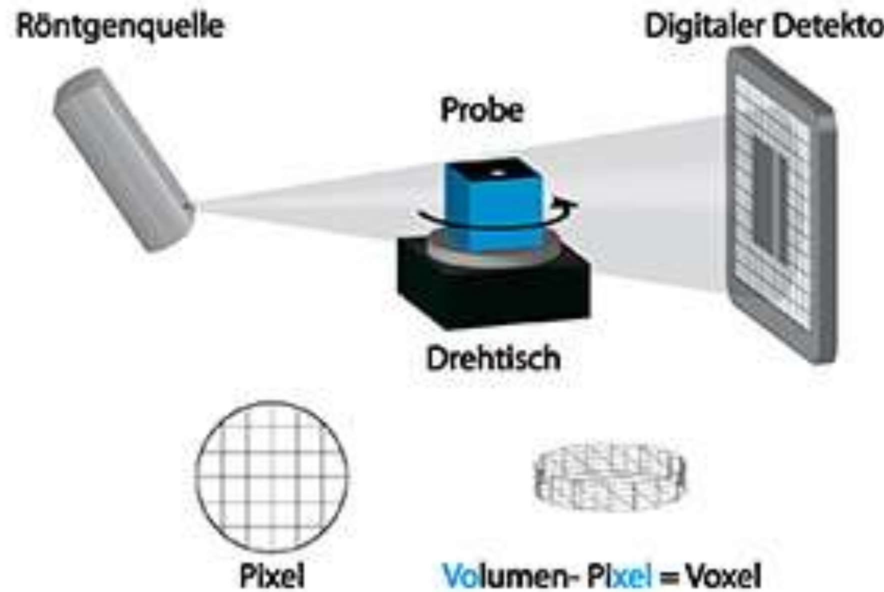




Shearografie-System

Möglichkeiten der Anregung

Methoden der ZfP
Radiografische Prüfmethoden



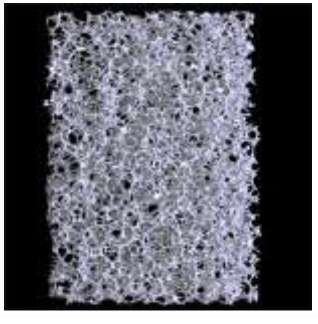
„Konventionelle Radiografie“ **Computertomografie**

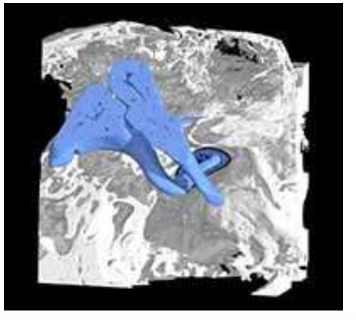
P. Mix. *Introduction to Nondestructive Testing: A Training Guide.* Wiley, 2005.

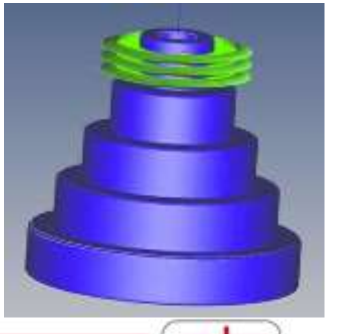
Methoden der ZfP
Computertomografie in der FH Wels

Dual source computed tomography system
225 kV and 450 kV X-ray source
2048 * 2048 pixel flat panel detector
5 µm min. voxel size

Nano computed tomography system
160 kV X-ray source
Dual detector system with 1920 * 1536 pixel flat panel detector
and 4032 * 2688 pixel CCD camera
50 nm min. voxel size



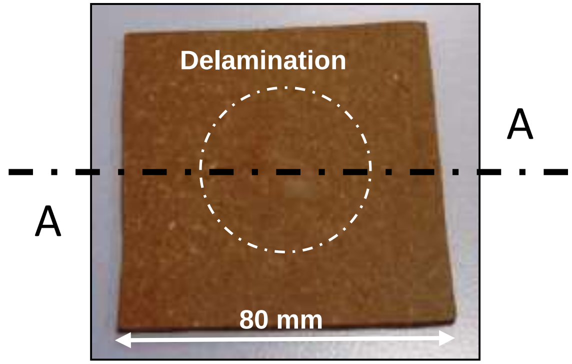




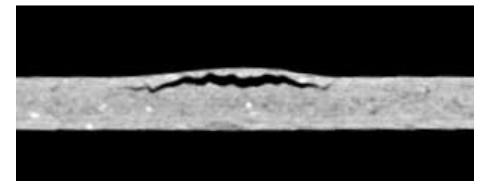
Methoden der ZfP
Vergleich Delamination

Components:
wood flour + melamine resin

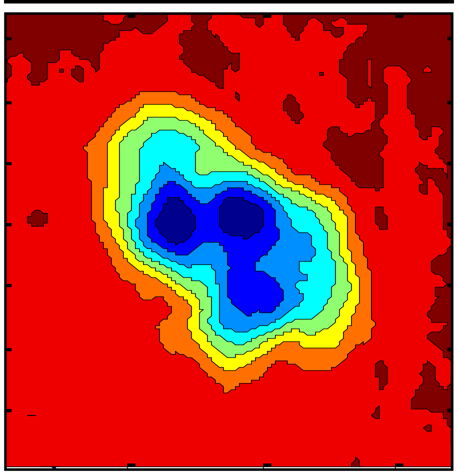
Applications:
automobile industry
furniture industry



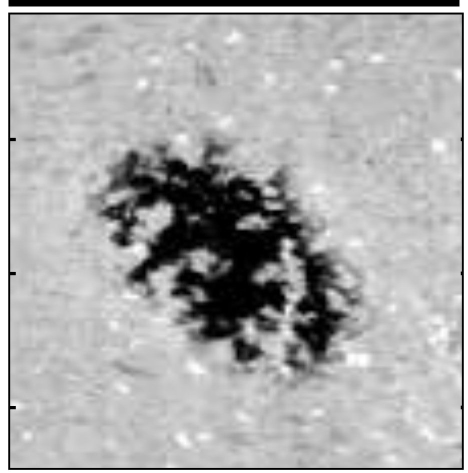
Schnitt A-A



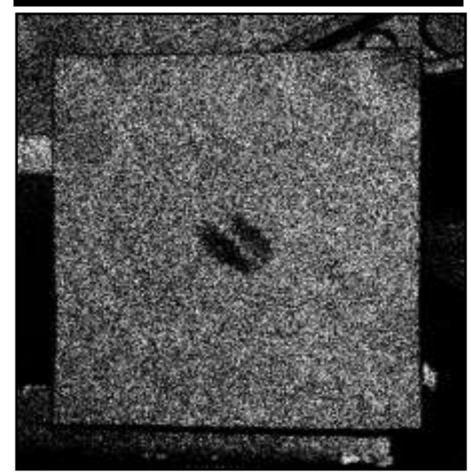
Active Thermografie



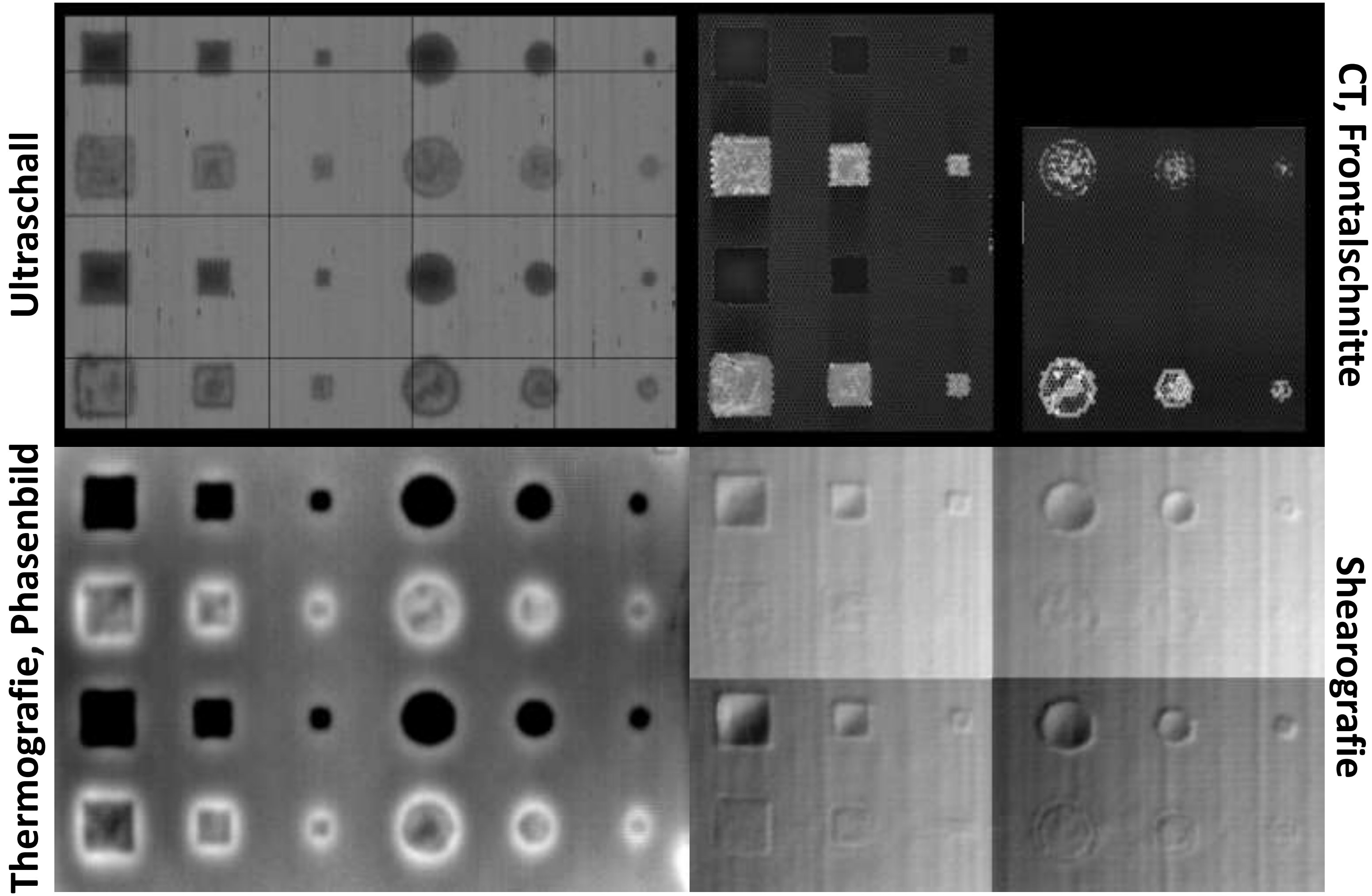
CT



Digitale Shearografie



Methoden der ZfP
Vergleich Honeycomb-Sandwich mit Aluminiumkern

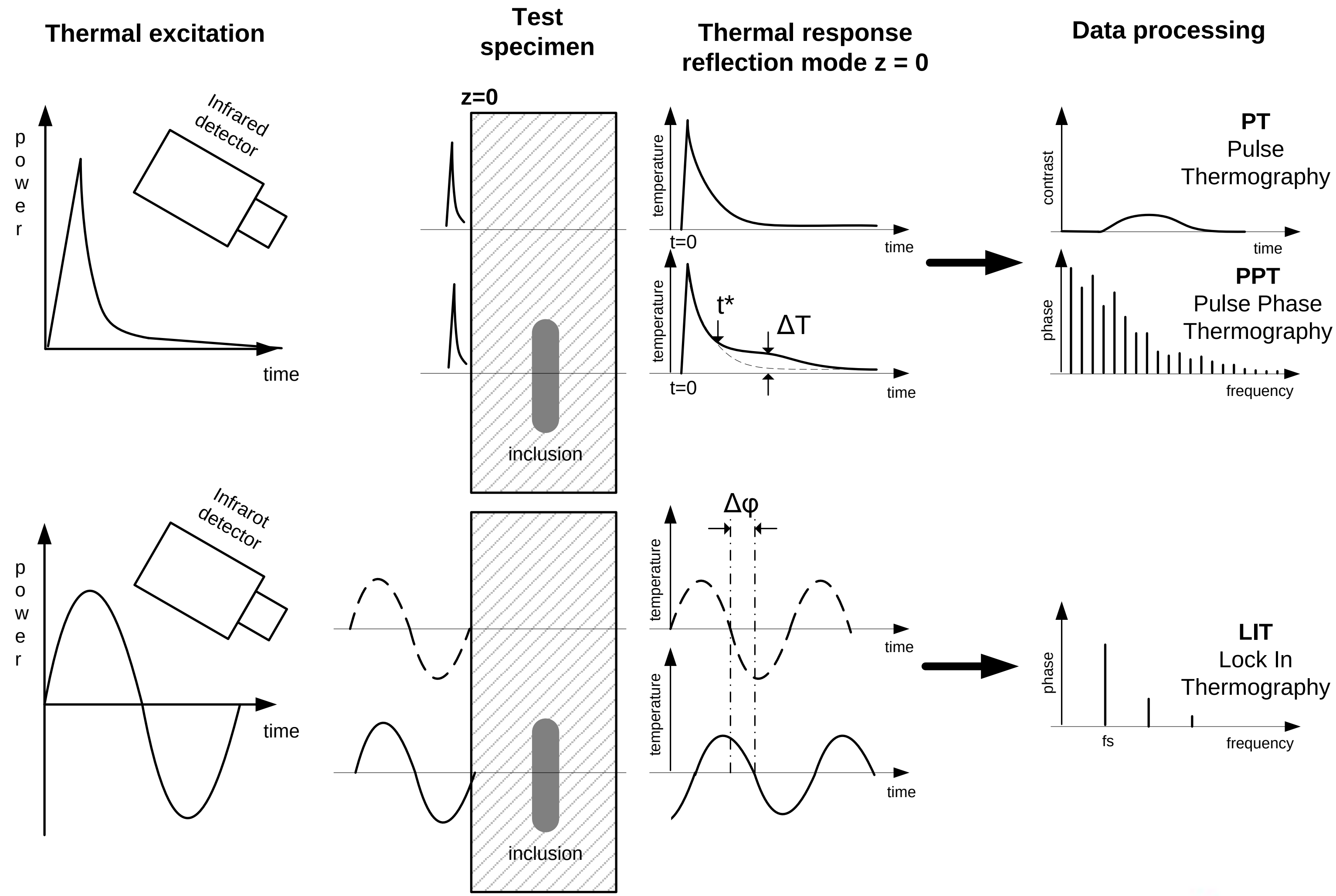


Infrarot – Methoden

Aktive Thermografie

Auswertung von Defekten und von Parametern

Puls- und Lock-In Thermografie



Grundlagen der Wärmeleitung

Allgemeine Wärmeleitungsgleichung:

$$\boxed{C\rho\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_y\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)+w(x,y,z)}$$

→ bei isotropen Material: $k_x = k_y = k_z$
→ Innere Wärmequelle w = 0 (bei der zerstörungsfreien Prüfung)

Fourier Gleichung:

$$\boxed{\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{k}{\rho c}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)} \qquad \boxed{\alpha=\frac{k}{\rho\cdot c}}$$

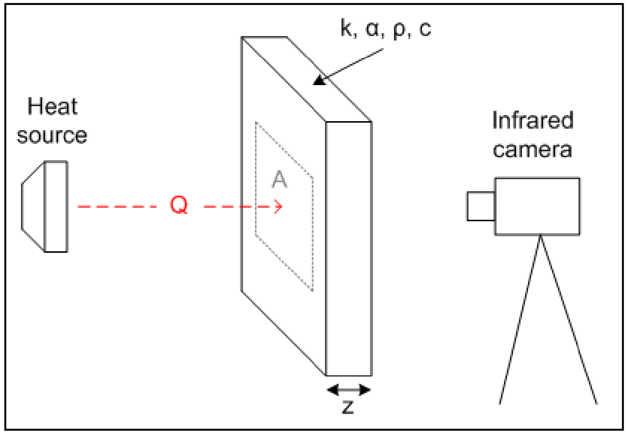
... Temperaturleitfähigkeit
bzw. Diffusivität

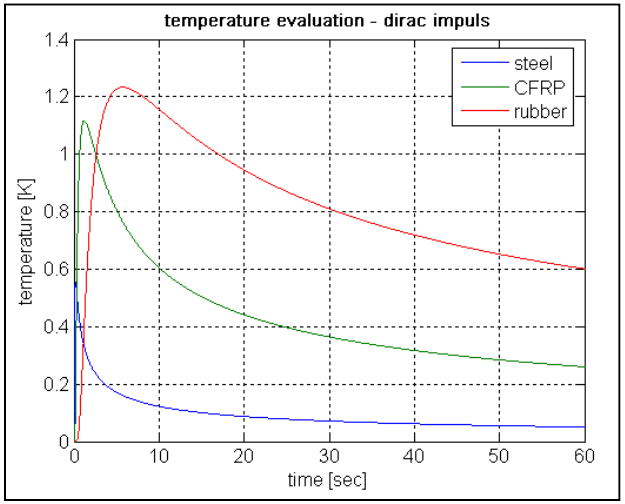
Lösung der Fourier – Gleichung für eine DIRAC Impuls:

$$\boxed{T(t)=T_0+\left[\frac{Q/A}{\rho\cdot c\cdot\sqrt{4\pi\cdot\alpha\cdot t}}\right]\cdot\exp\left(\frac{-z^2}{4\cdot\alpha\cdot t}\right)}$$

berechnetes Modell für verschiedene Materialien

- für einen Dirac Impuls
- eindimensionalen Fall
- thermisch dicke Platte
- in Abhängigkeit der Dicke z





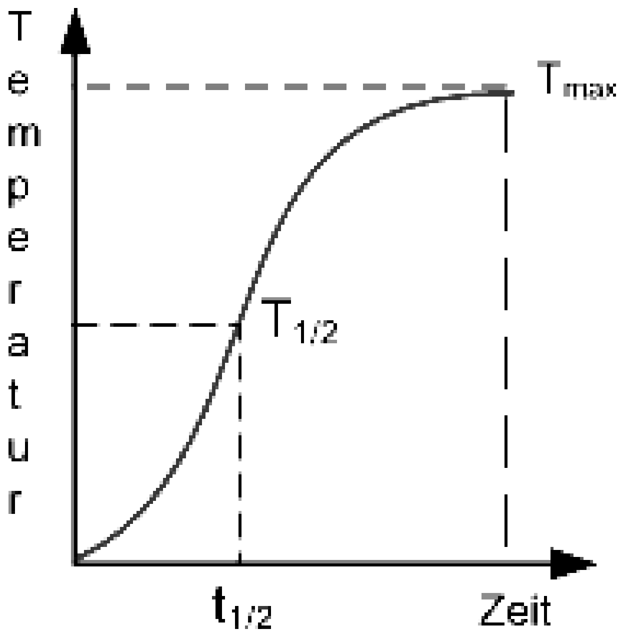
Verwendete Formelzeichen

T ... Temperatur
ρ ... Dichte
k ... Wärmeleitfähigkeit
c ... Spezifische Wärme
α ... Temperaturleitfähigkeit

Q ... Anregungsenergie
A ... Fläche
z ... Tiefe

Bestimmung der Diffusionszeit

Parkers Methode



$$t_D = \frac{L^2}{a} = t_{1/2}\,\frac{\pi^2}{1.38}$$

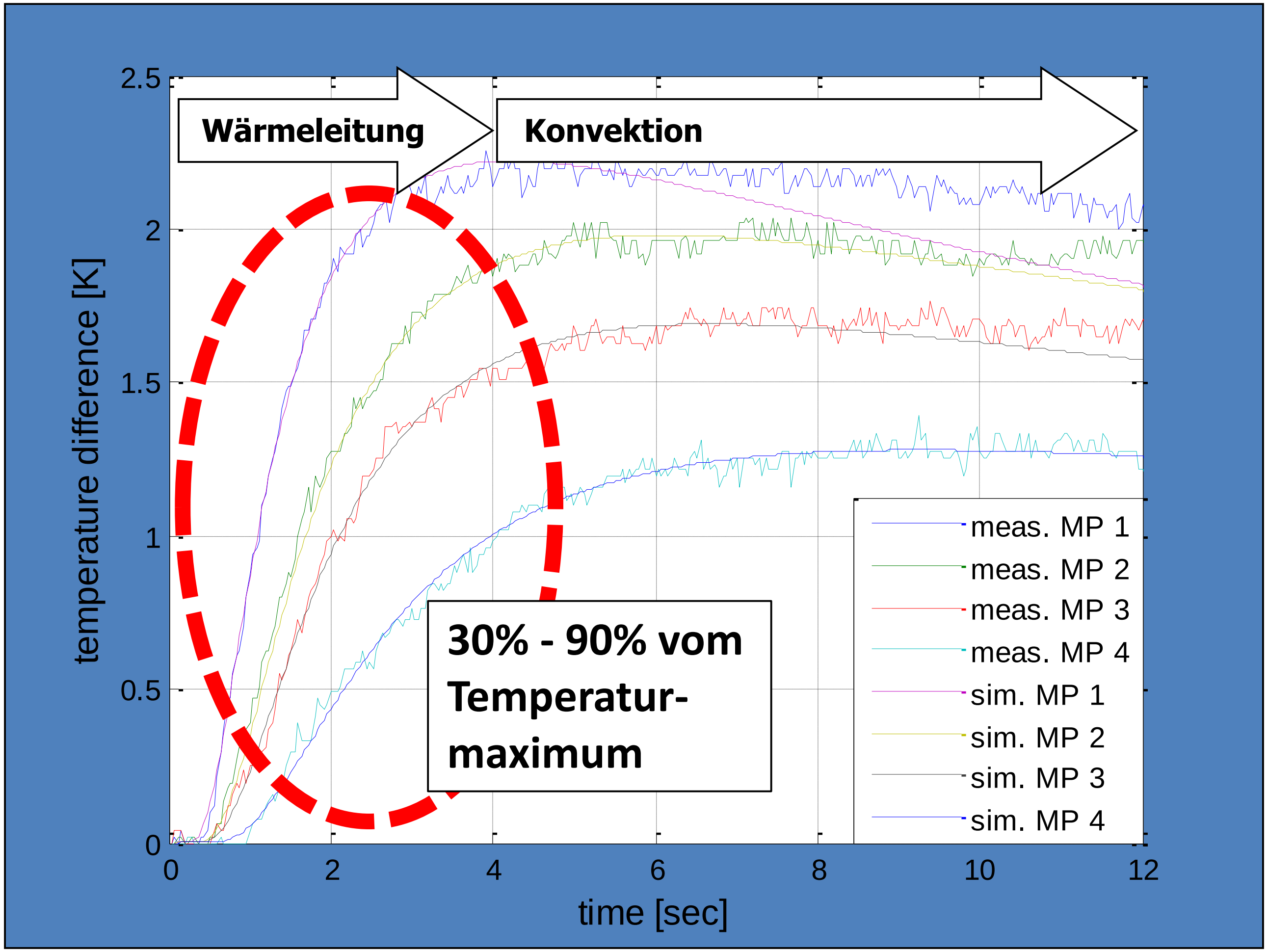
Vorteile

- Schnelle und einfache Auswertemethode
- Standardmethode

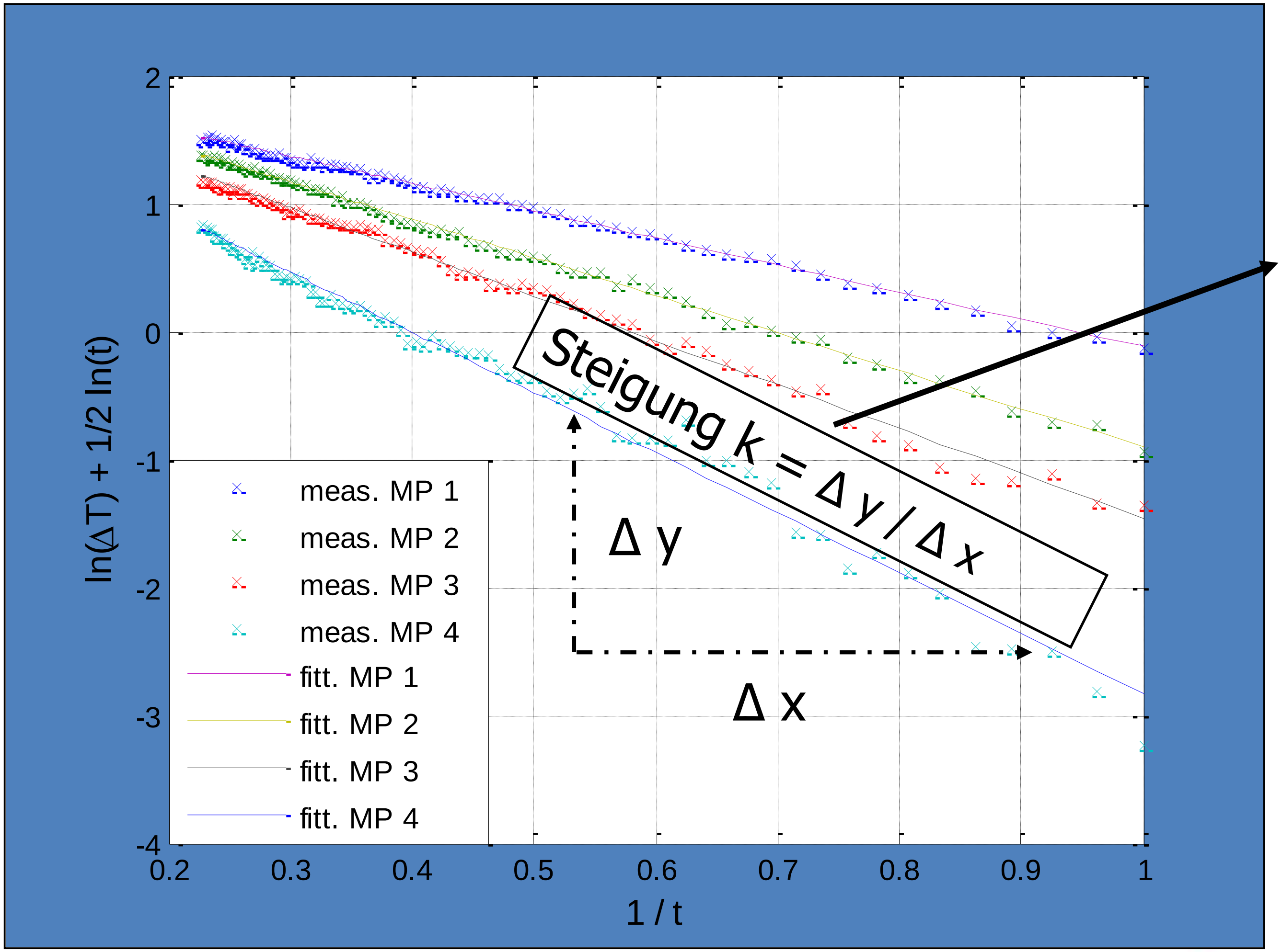
Nachteile

- Ungenau bei niedriger Zeitabtastung
- Ungenau bei schlechter Temperaturauflösung

Linear Diffusivity Fit



Linear Diffusivity Fit
Bestimmen der thermischen Diffusivität α

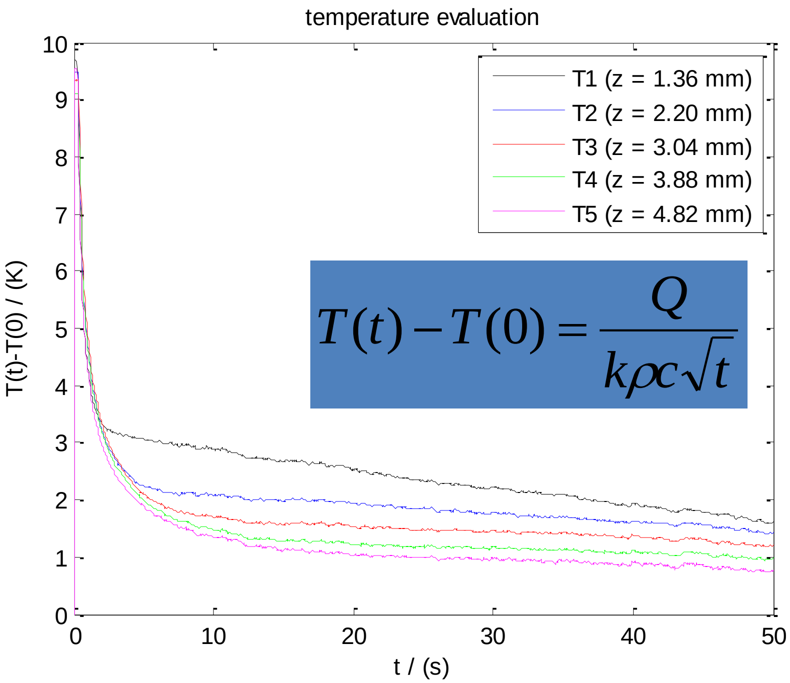


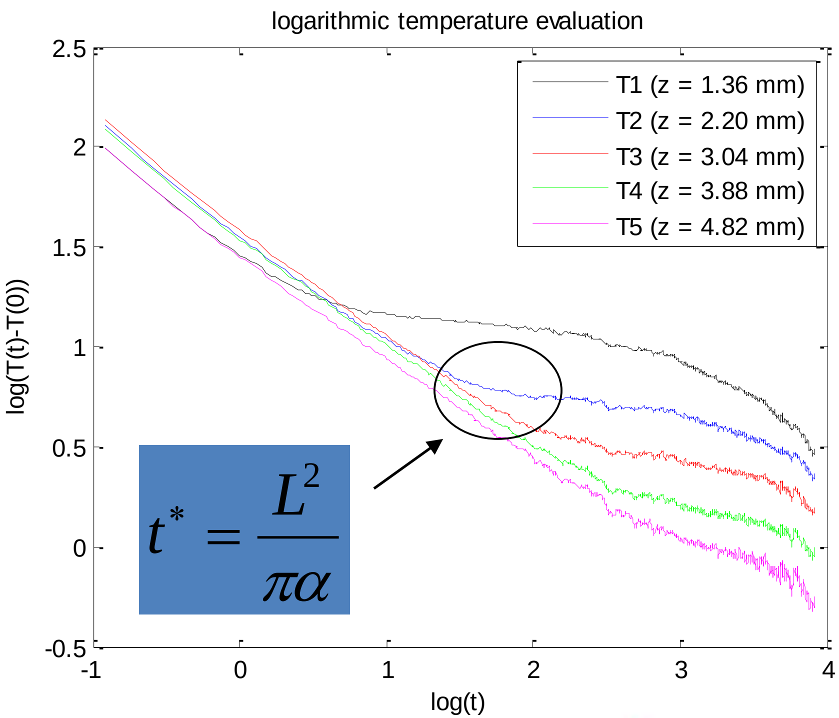
$$\alpha = -\frac{z^2}{4 \cdot k}$$

TSR Methode

Reflexionsmodus

Thermal Signal Reconstruction



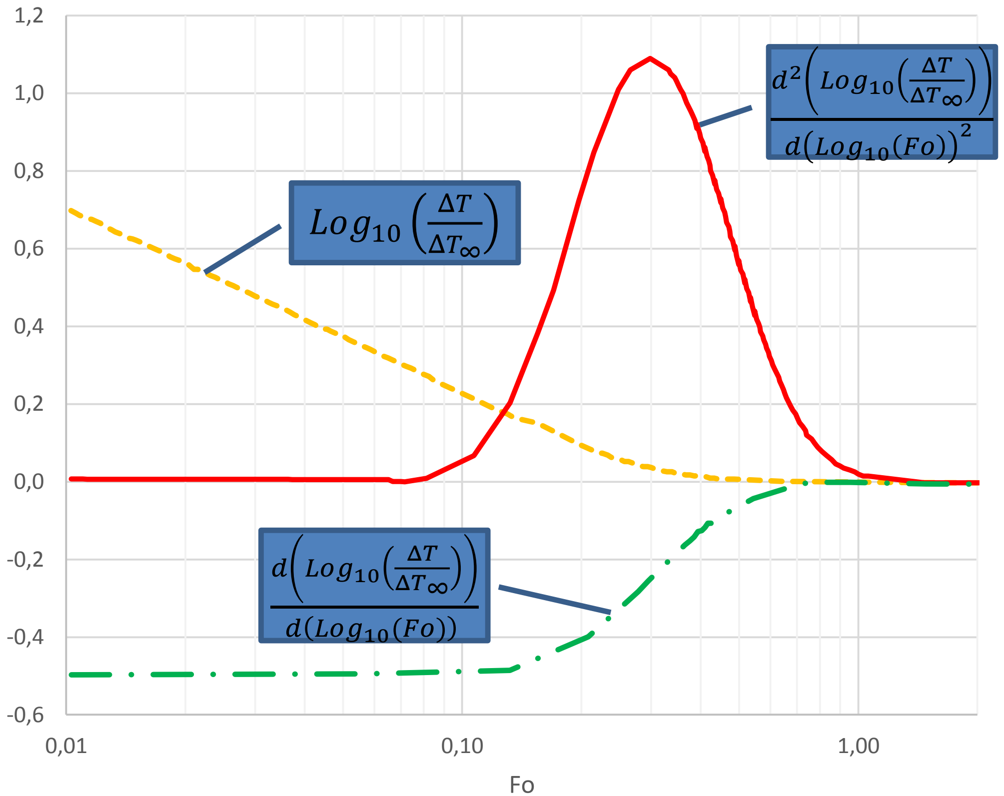


Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit
Thermal Signal Reconstruction – Methode (TSR)

$$\Delta T(t) = \frac{Q}{e \cdot \sqrt{\pi t}} \quad \text{mit}$$
$$\mathrm{e} = \sqrt{k \rho c}$$

Geradengleichung:

$$\ln\left(\Delta T(t)\right) = \ln\left(\frac{Q}{e}\right) - \frac{1}{2}\ln(\pi t)$$



Source: D. Balageas, Thickness or diffusivity measurements from front-face flashexperiments using TSR approach, In: Proc. 10th QIRT, Quebec, p. 873-880, 2010

Linear Effusivity Fit

Motivation

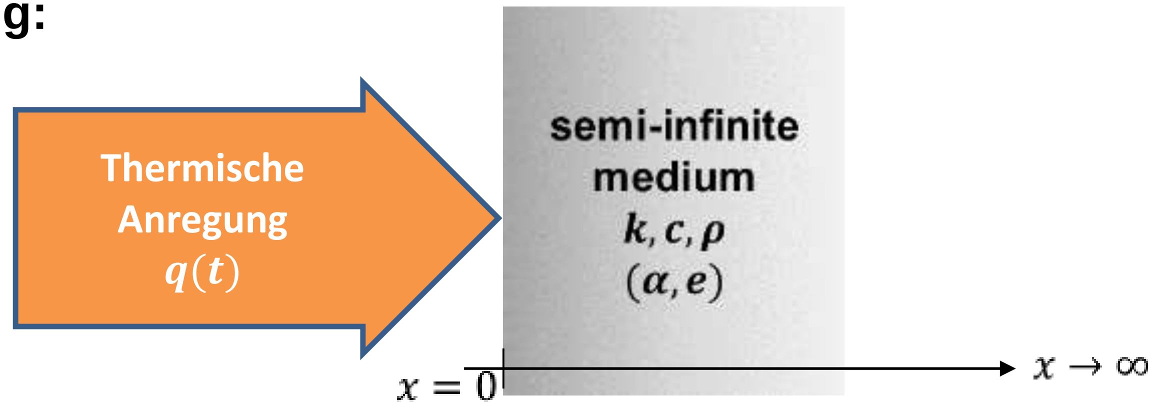
- Bei der Überprüfung muss entschieden werden, ob in Reflexion oder in Transmission gemessen wird. Diese Entscheidung hängt oftmals von der Zugänglichkeit der Probe ab.
- Meistens ist die Messung von der Vorderseite erwünscht.
- Bei einigen Auswertemethoden sind komplexe Fitting-Algorithmen anzuwenden – dies kann zu uneindeutigen Lösungen führen.

Daher: Entwicklung einer neuen Methode, mit der die thermische Effusivität e einer Probe in Reflexion ermittelt werden kann.

$$e = \sqrt{k \cdot \rho \cdot c} \qquad [e] = W m^{-2} K^{-1} s^{0.5}$$

Methode

Wärmeleitungsgleichung: Vom Zeit- in den Laplace-Raum



	Zeit $\circ\!\!-\!\!\bullet$	Laplace
Wärmeleitungs-gleichung	$\frac{\partial^2}{\partial x^2} T(x,t) = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial}{\partial t} T(x,t)$	$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \bar{T}(x,s) = \frac{s}{\alpha} \cdot \bar{T}(x,s)$
Rand-bedingung 1	$-k \cdot \frac{\partial}{\partial x} T(x,t)\Big\vert_{x=0} = q(t)$	$-k \cdot \frac{\partial}{\partial x} \bar{T}(x,s)\Big\vert_{x=0} = \bar{q}(s)$
Rand-bedingung 2	$T(\infty, t) = 0$	$\bar{T}(\infty, s) = 0$
Anfangs-bedingung	$T(x, 0) = 0$	$\bar{T}(x, 0) = 0$

Methode
Lösung im Laplace Raum

Allgemeine Lösung der Wärmeleitungsgleichung:

$$\bar{T}(x,s) = \mathrm{C}_1 \cdot e^{x \cdot \frac{\sqrt{s}}{\sqrt{\alpha}}} + C_2 \cdot e^{-x \cdot \frac{\sqrt{s}}{\sqrt{\alpha}}}$$

Randbedingung 2:

$$\bar{T}(\infty, 0) = 0 \;\rightarrow C_1 = 0$$

Randbedingung 1:

$$-k \cdot \left.\frac{\partial T(x,s)}{\partial x}\right|_{x=0} = \bar{q}(t)$$

$$-k \cdot \left(\frac{\sqrt{s}}{\sqrt{\alpha}}\right) \cdot C_2 \cdot e^{\left(-x \cdot \frac{\sqrt{s}}{\sqrt{\alpha}}\right)} = \bar{q}(s) \rightarrow C_2 = \bar{q}(s) \cdot \frac{\sqrt{\alpha}}{k \cdot \sqrt{s}} = \bar{q}(s) \cdot \frac{1}{e \cdot \sqrt{s}}$$

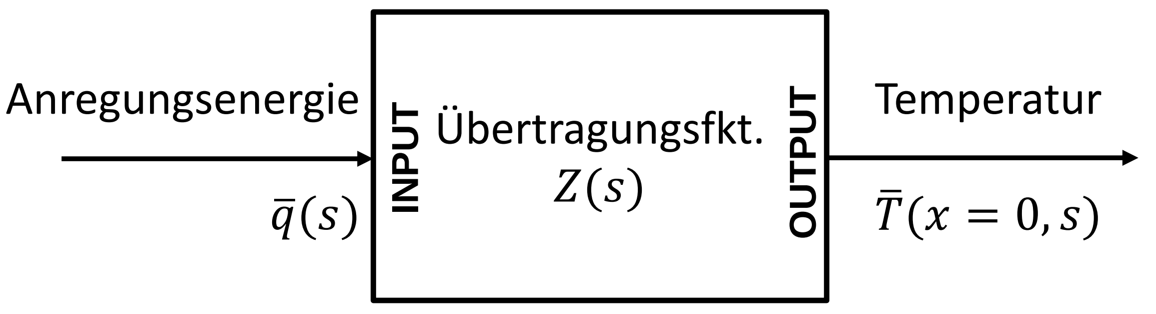
Lösung:

$$\boxed{\bar{T}(0,s) = \frac{\bar{q}(s)}{e \cdot \sqrt{s}}}$$

Übertragungsfunktion

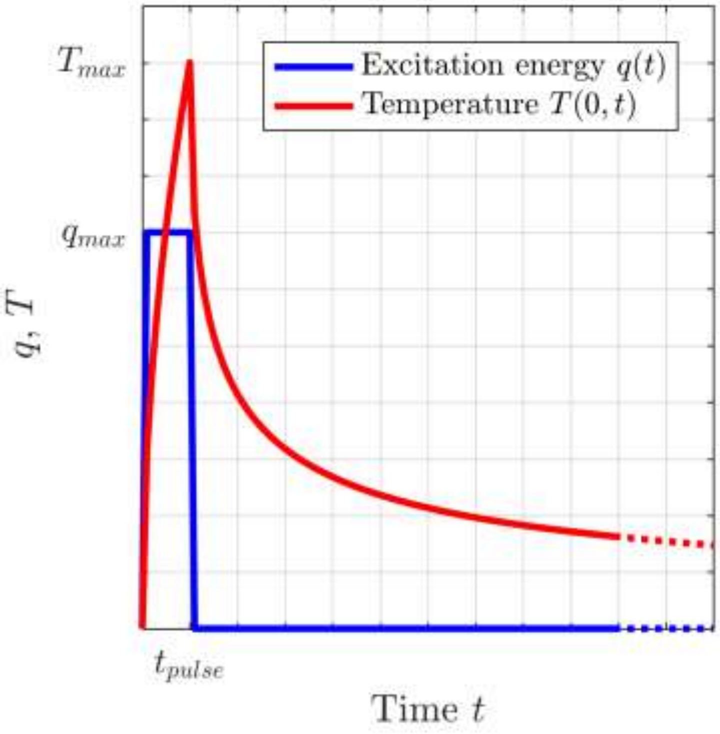
Die Übertragungsfunktion $Z(s)$ für Wärmeübertragung in einem halbunendlichen Medium lautet:

$$Z(s) = \frac{\text{Ausgang}}{\text{Eingang}}$$



$$Z(s) = \frac{\bar{T}(0,s)}{\bar{q}(s)} = \frac{\dfrac{\bar{q}(s)}{e \cdot \sqrt{s}}}{\bar{q}(s)} = \frac{1}{e \cdot \sqrt{s}}$$

Methode
Anregungssignal



Anregung der Probenoberfläche mit einem Rechteckpuls:

$$q(t) = q_{max} \cdot \left(\mathcal{H}(t) - \mathcal{H}\left(t - t_{pulse}\right)\right)$$

Die Temperatur an der Oberfläche steigt während der Zeit

$$0 \leq t \leq t_{pulse}$$

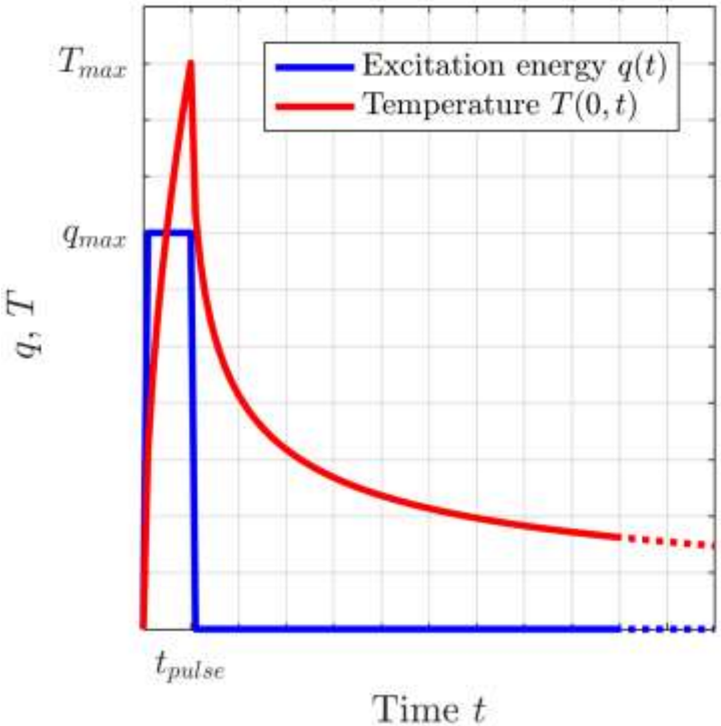
und sinkt nach der Zeit

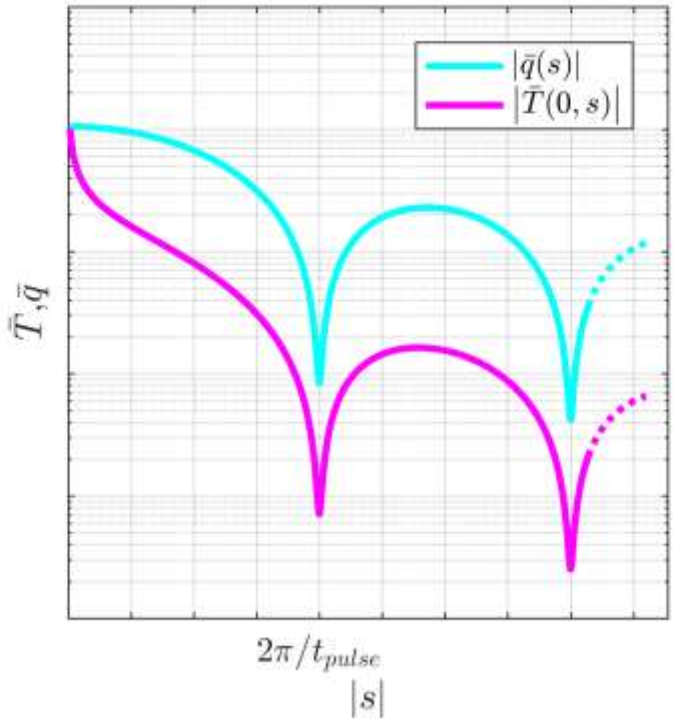
$$t > t_{pulse}$$

Methode

Lösung im Laplace-Raum: Anregung mittels Rechteckpuls

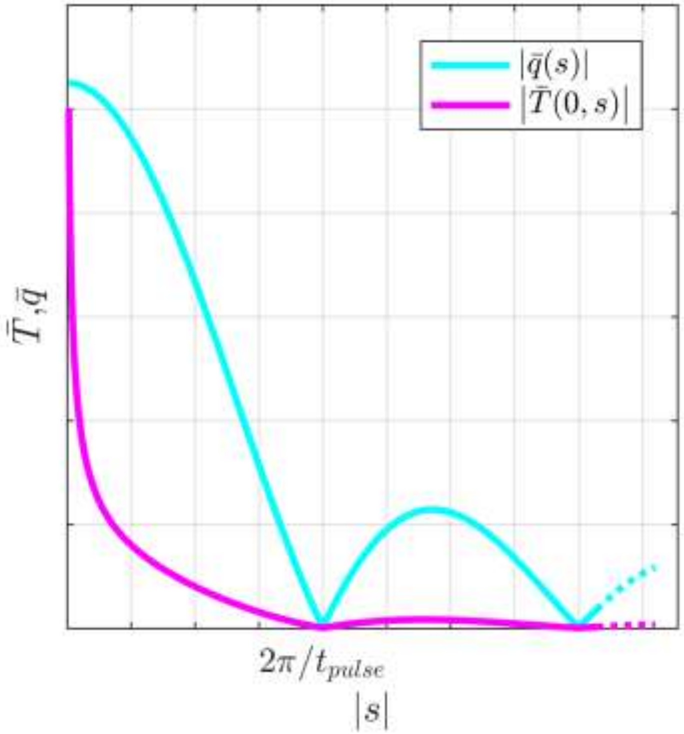
$$\bar{T}(0,s) = \frac{1}{e \cdot \sqrt{s}} \cdot \bar{q}(s)$$

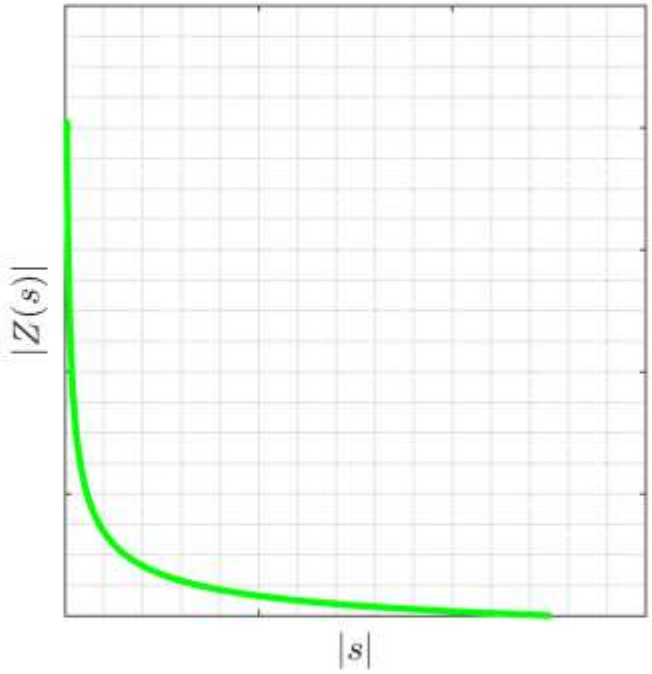




Methode
Thermische Übertragungsfunktion

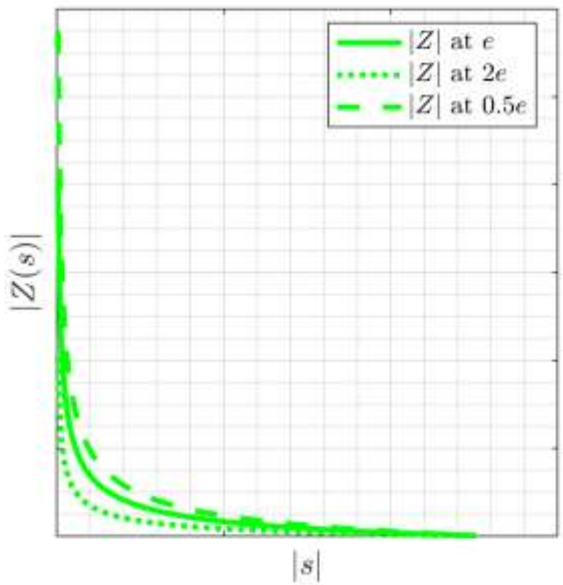
$$Z(s) = \frac{\bar{q}(s)}{\bar{T}(0,s)} = \frac{1}{e\sqrt{s}}$$

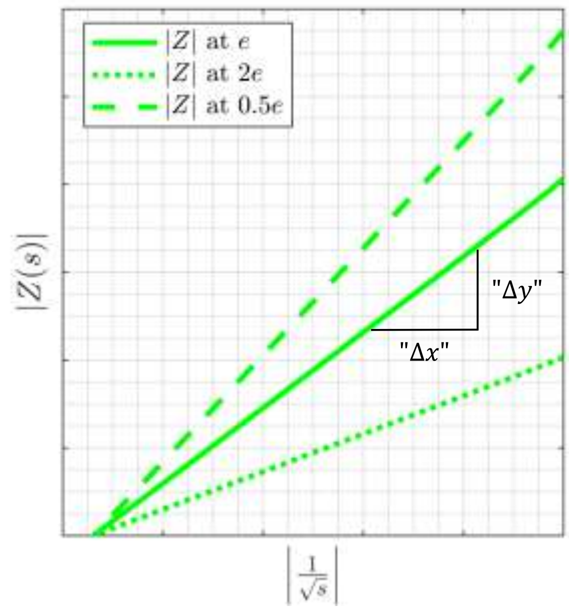




Methode
Übertragungsfunktion → Linear Effusivity Fit

Ändert man die Einheit der x-Achse, erhält man einen linearen Zusammenhang:





Steigung$= \dfrac{\Delta y}{\Delta x} = \dfrac{1}{e}$

Die Steigung der Gerade ist der Kejrwert der thermischen Effusivität e.
Die thermische Effusivität kann durch Anlegen einer Geraden ermittelt werden, einem **L**inear **E**ffusivity **F**it (LEF).

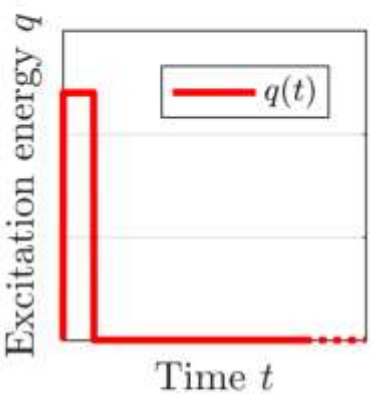
Experiment
Zusammenfassung LEF

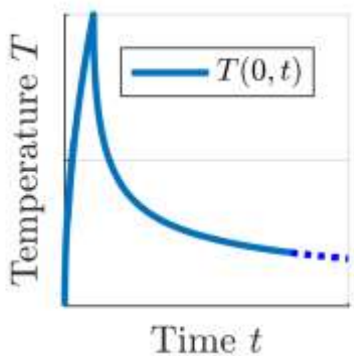
Thermische Anregung der Probe $q(t)$

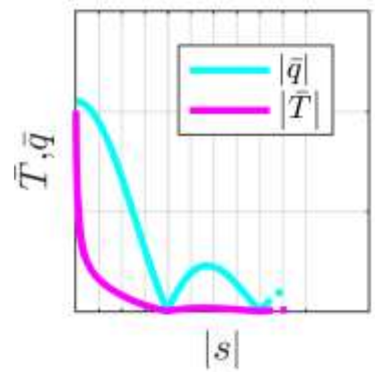
Temperatur aufzeichnen $T(x=0,t)$

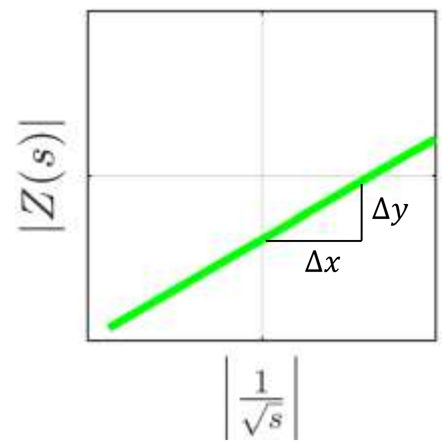
$T(t)$ $\circ\!\!-\!\!\bullet$ $\bar{T}(s)$
$q(t)$ $\quad$ $\bar{q}(t)$

Linear Effusivity Fit

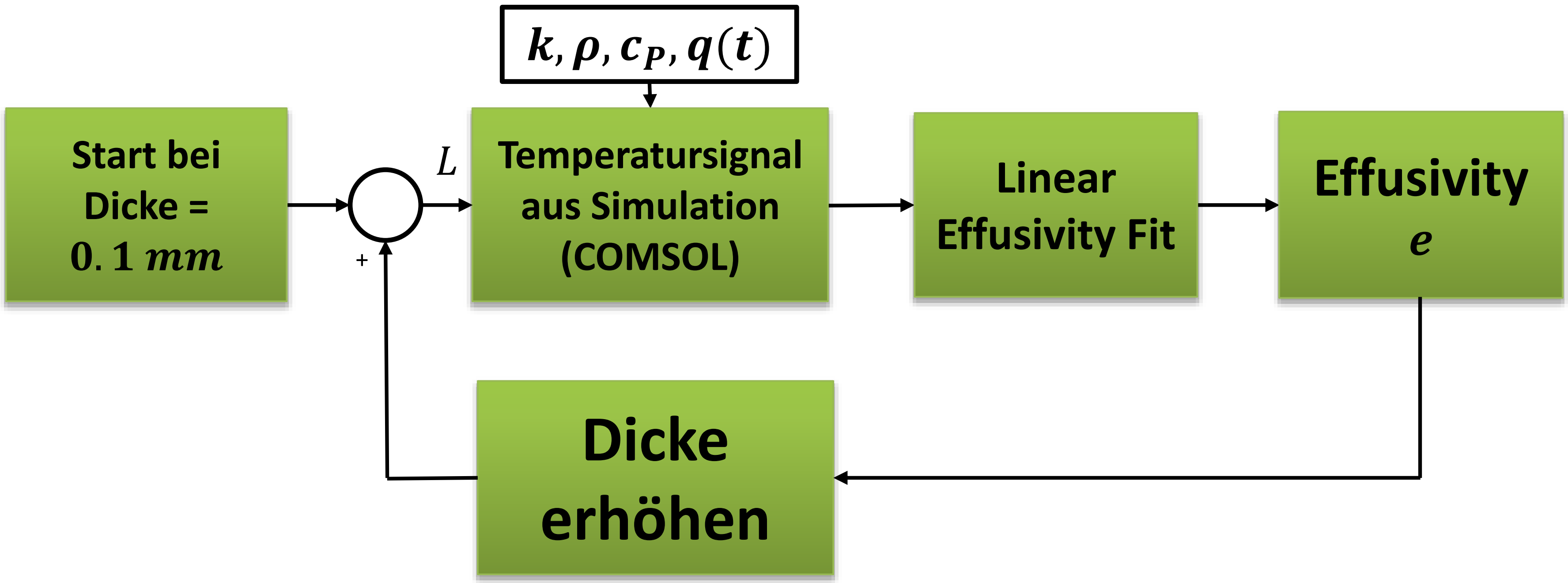








Simulation
Einfluss der Probendicke



Simulation
Einfluss der Probendicke

Fragestellung: Wie dick darf eine Probe sein, obwohl die Methode auf einem halbunendlichen Modell beruht?

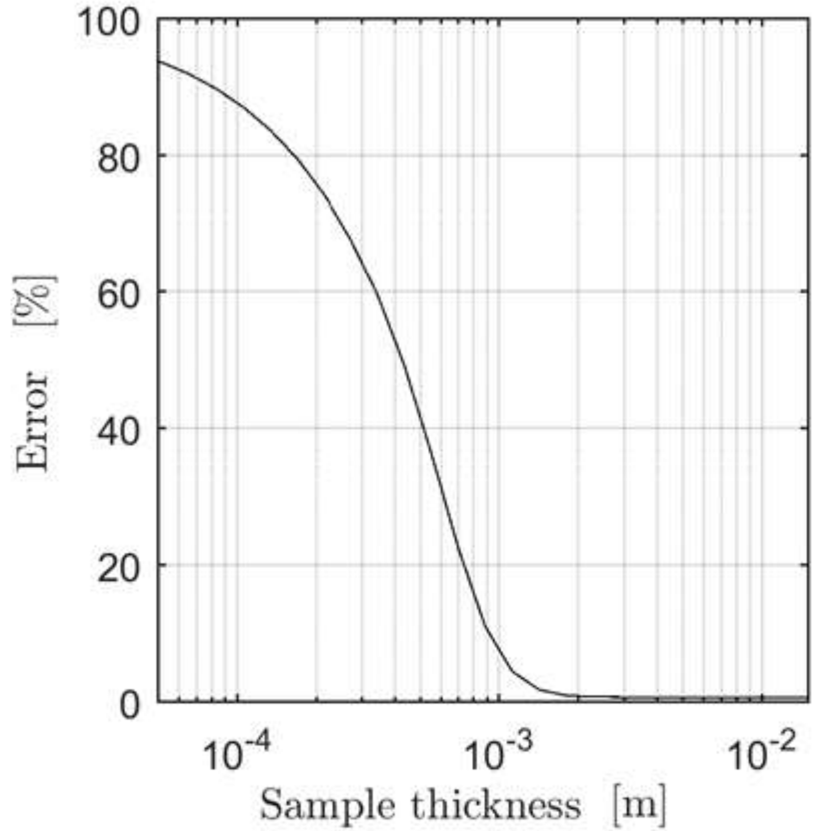
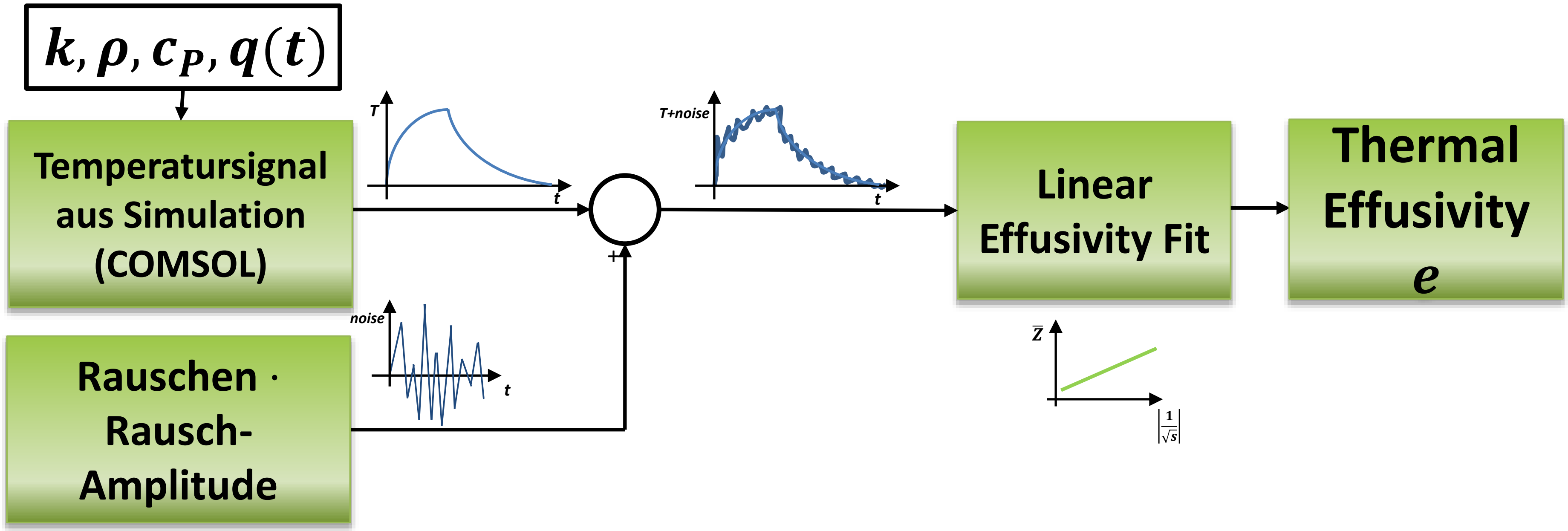


Diagramm gilt für $e = e_{CFRP} \approx 1100 W m^{-2} K^{-1} s^{0.5}$

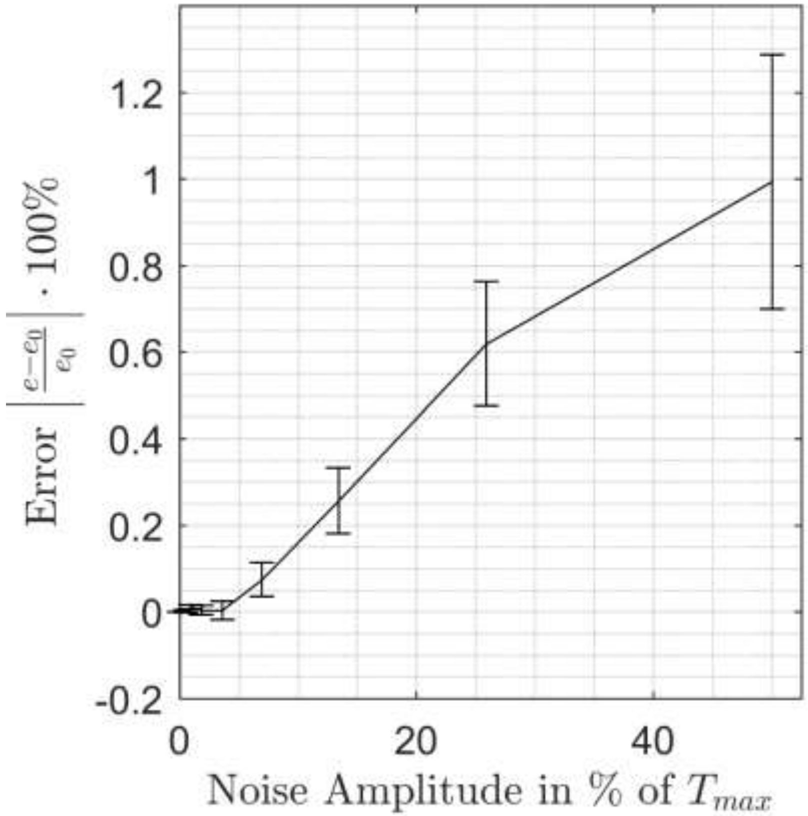
Simulation

Einfluss von Rauschen auf die Methode



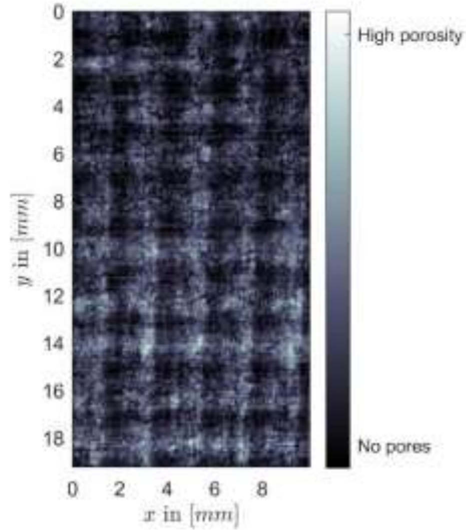
1. Wiederhole n-mal um den statistischen Fehler durch Rauschen zu ermitteln
2. Erhöhe Rausch-Amplitude um den systematischen Fehler zu erhalten

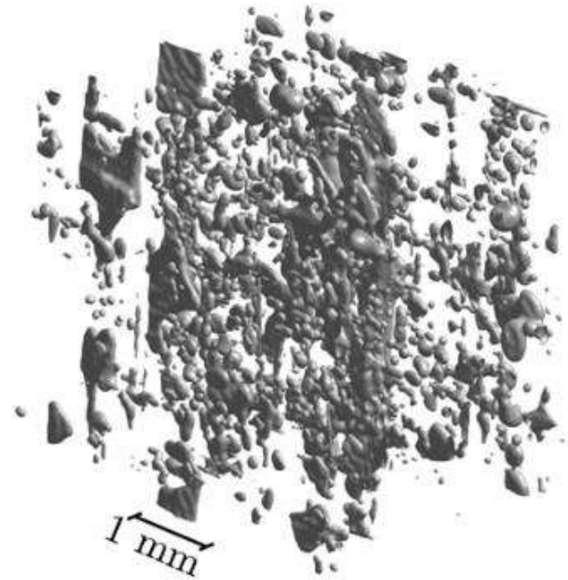
Simulation
Einfluss von Rauschen



UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES UPPER AUSTRIA

Experiment
Proben

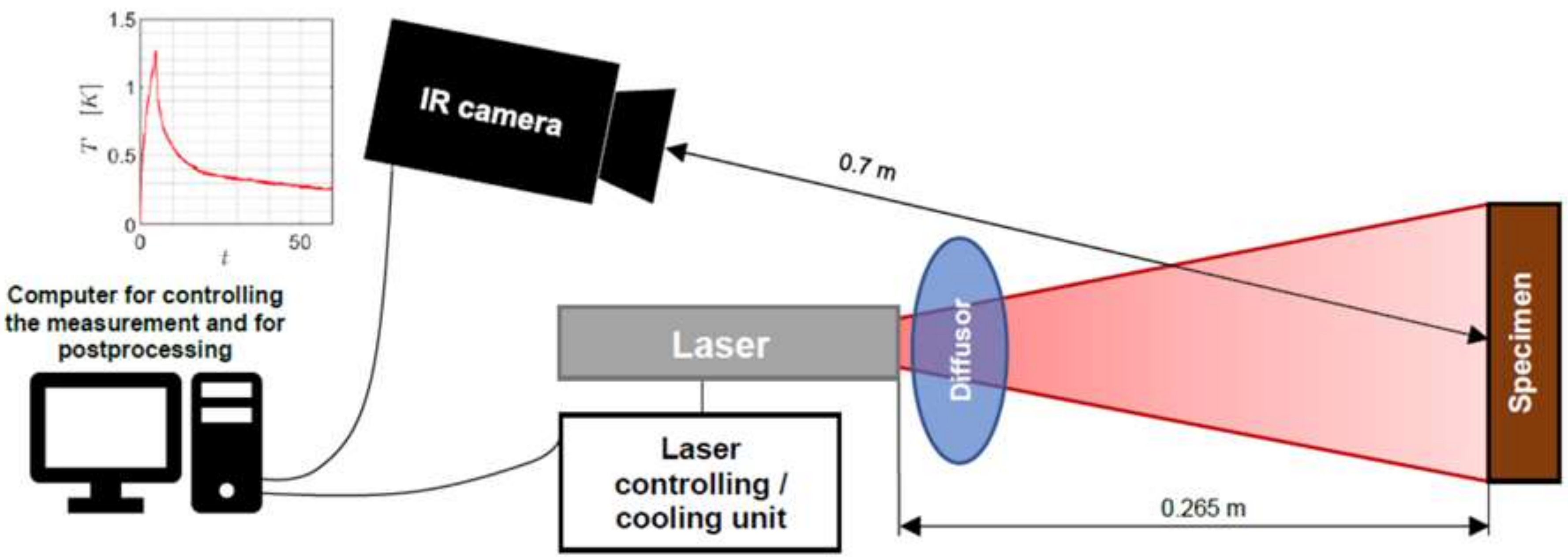




Sample No.	Porosity Φ in [%]	Sample width L in [mm]	Diffusion time t_D in [s]
1	0	4.25	46
2	0	4.34	50.6
3	0.32	4.32	48.52
4	0.45	4.36	52.4
5	0.94	4.36	51.76
6	1.49	4.51	55.94
7	3.64	4.51	59.52
8	5.62	4.7	63.85
9	9.99	4.82	74.87
10	10.0	4.83	75.19

$$e_{CFRP} \approx 1100\, W s^{0.5} K^{-1} m^{-2}$$
$$e_{Air} \approx 5\, W s^{0.5} K^{-1} m^{-2}$$

Experiment Setup



IR camera: FLIR X8400SC (InSb-Detektor)
Laser: Lumics LU0808D300, λ=808 nm, $P = 30\ W$

Numerische Laplace-Transformation

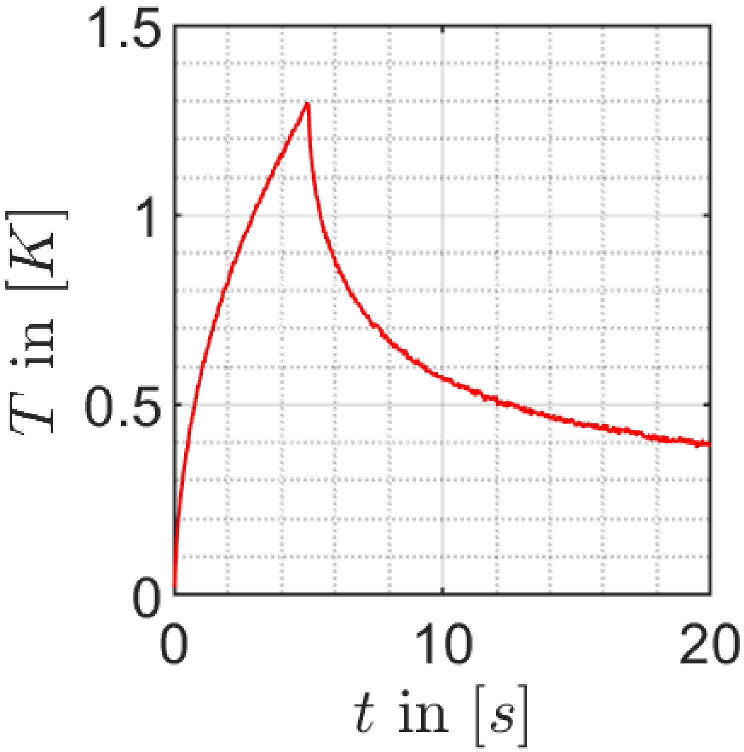
$$\bar{\boldsymbol{f}}(\boldsymbol{s}) = \boldsymbol{\mathcal{L}}\{\boldsymbol{f}(\boldsymbol{t})\} = \boldsymbol{\Delta_t} \sum_{\boldsymbol{n=0}}^{\infty} \boldsymbol{e}^{-\boldsymbol{sn\Delta_t}} \cdot \boldsymbol{f}(\boldsymbol{n\Delta_t})$$

s ... komplexer Frequenzparameter ($s = \sigma + j\omega$)
Δ_t ... Abtastzeit
n ... Index (Zeitschritte)
$f(n\Delta_t)$ ... zu transformierende Funktion $f(n\Delta_t) \triangleq f(t)$

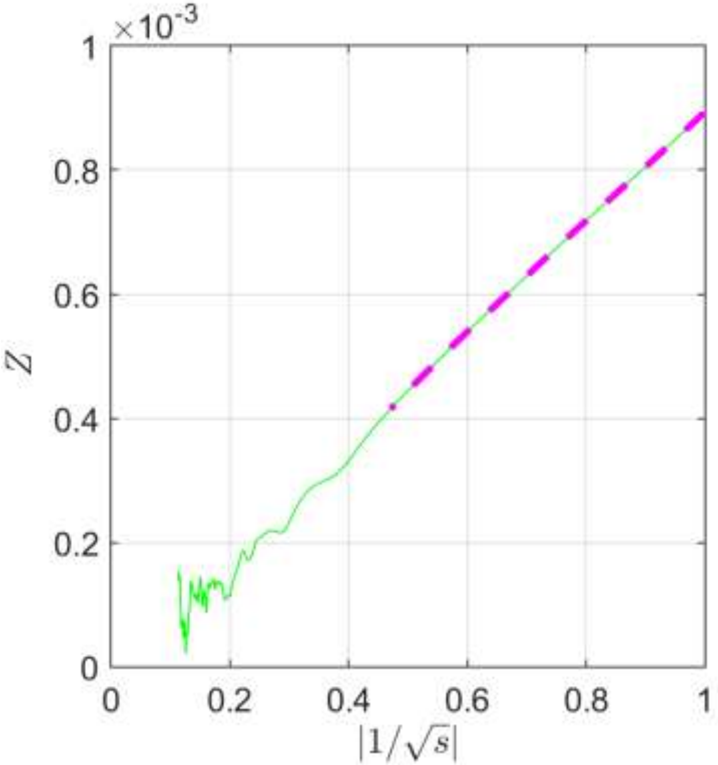
Für alle Berechnungen wurde $Re(s) = 1$ verwendet.

Experiment
Messungen

Temperatur $T(t)$

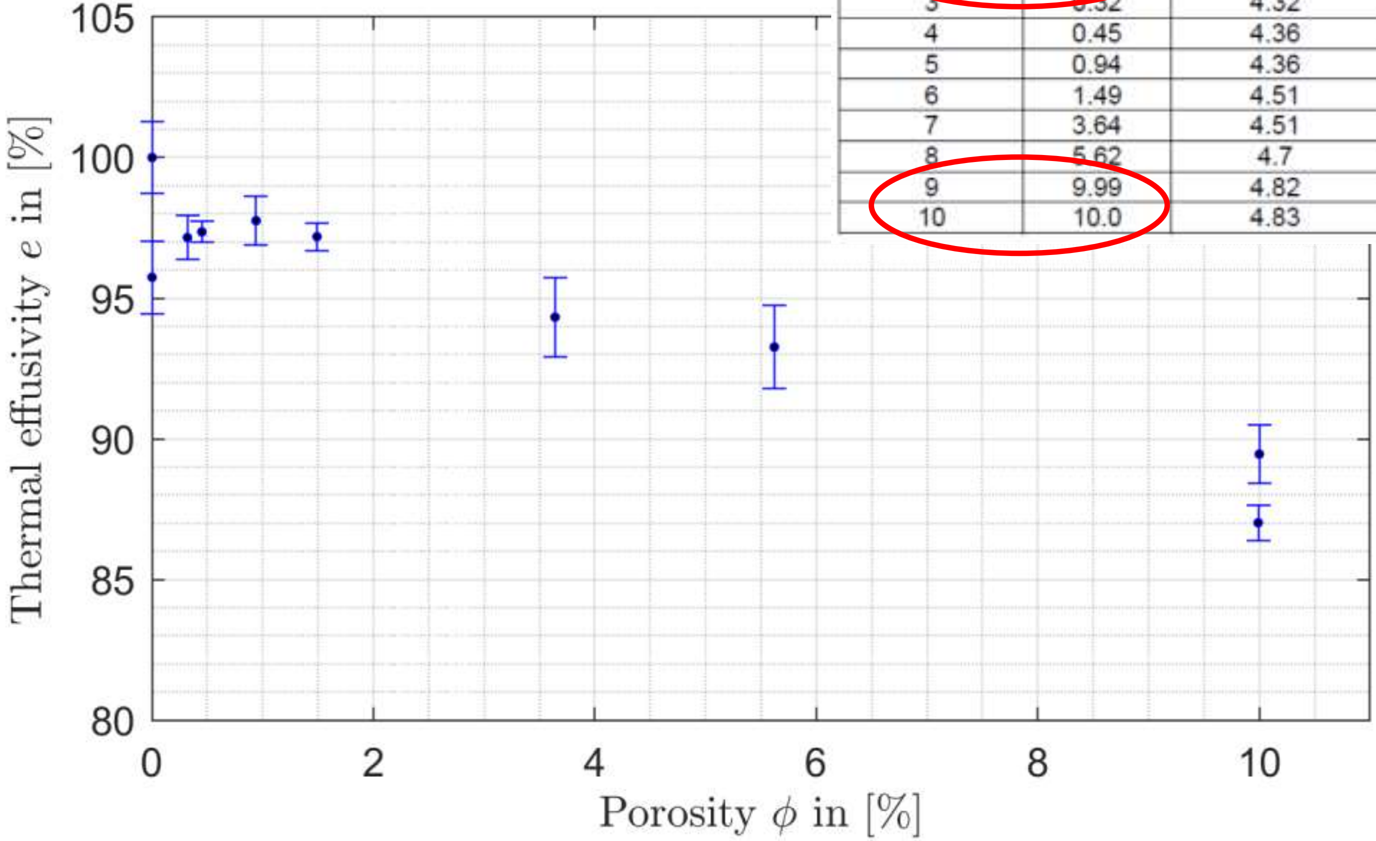


Übertragungsfunktion $Z(s)$

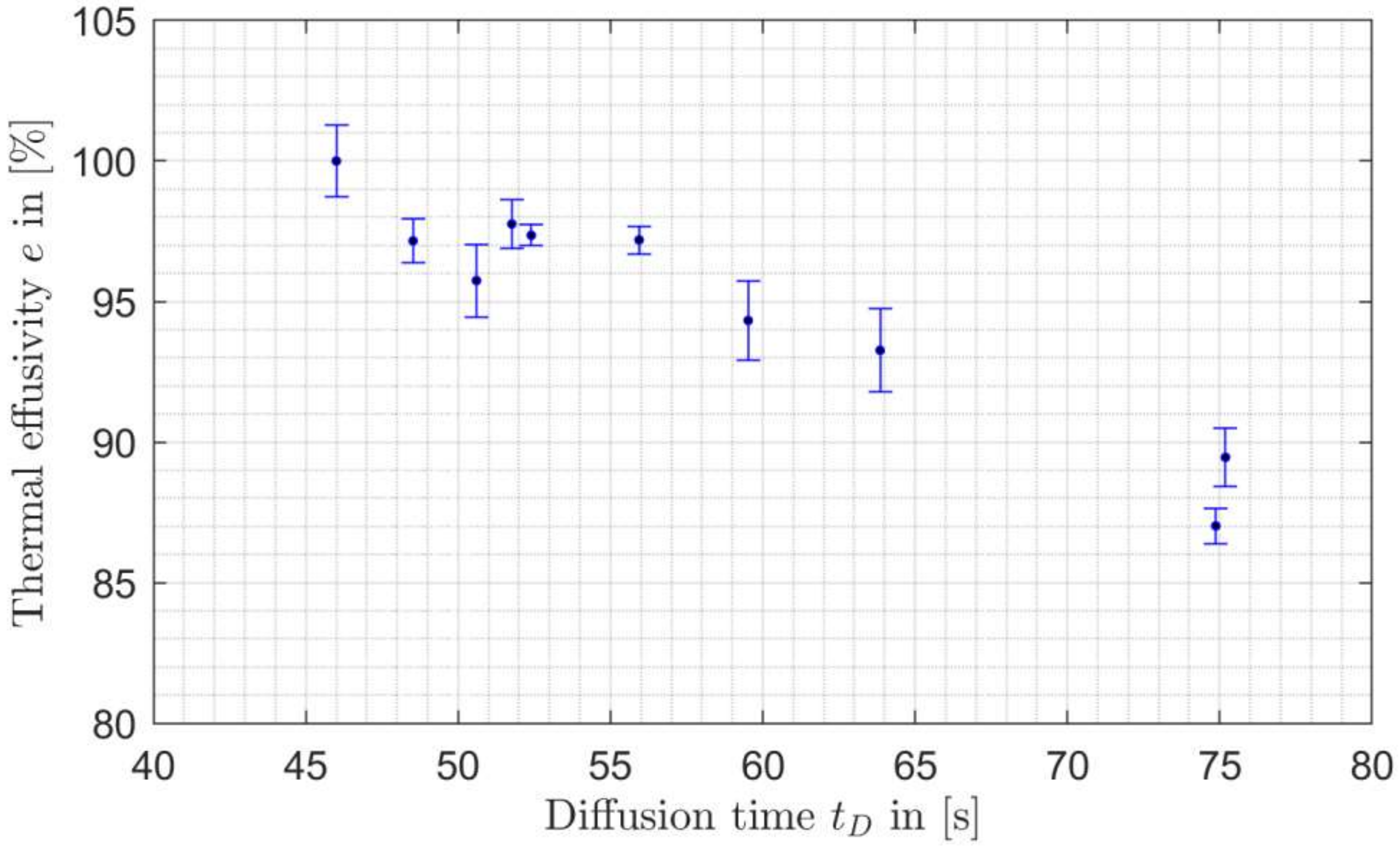


Experiment Resultate

Sample No.	Porosity Φ in [%]	Sample width L in [mm]	Diffusion time t_D in [s]
1	0	4.25	46
2	0	4.34	50.6
3	0.32	4.32	48.52
4	0.45	4.36	52.4
5	0.94	4.36	51.76
6	1.49	4.51	55.94
7	3.64	4.51	59.52
8	5.62	4.7	63.85
9	9.99	4.82	74.87
10	10.0	4.83	75.19



Experiment
Resultate



Vor- und Nachteile des LEF

Vorteile

- Es wird nur ein linearer Fit benötigt, keine Fits höherer Ordnung.
- Anregungs- und Abkühlphase kann zur Auswertung verwendet werden.
- Flexible Anregungsdauer.
- Andere Anregungsformen sind möglich.

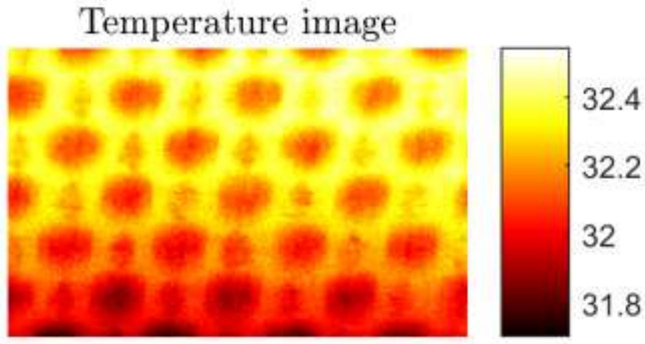
Nachteile

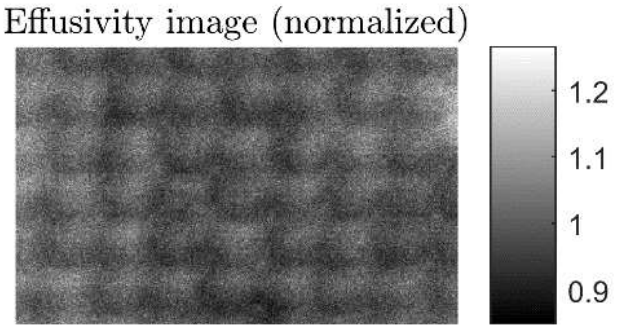
- Emissivität der Probe ist meist unbekannt.
- Die Anregungsenergie, die von der Probe aufgenommen wird, ist schwer abzuschätzen.
- Numerische Laplace-Transformation ist in Softwaretools meist nicht vorhanden und muss erst implementiert werden.

Ausblick

- Optimieren der Experimentparameter t_{step}, Experimentdauer und Abtastrate.

- Einsatz des LEF als bildgebende Methode.





- Experimente mit anderen Anregungsformen.

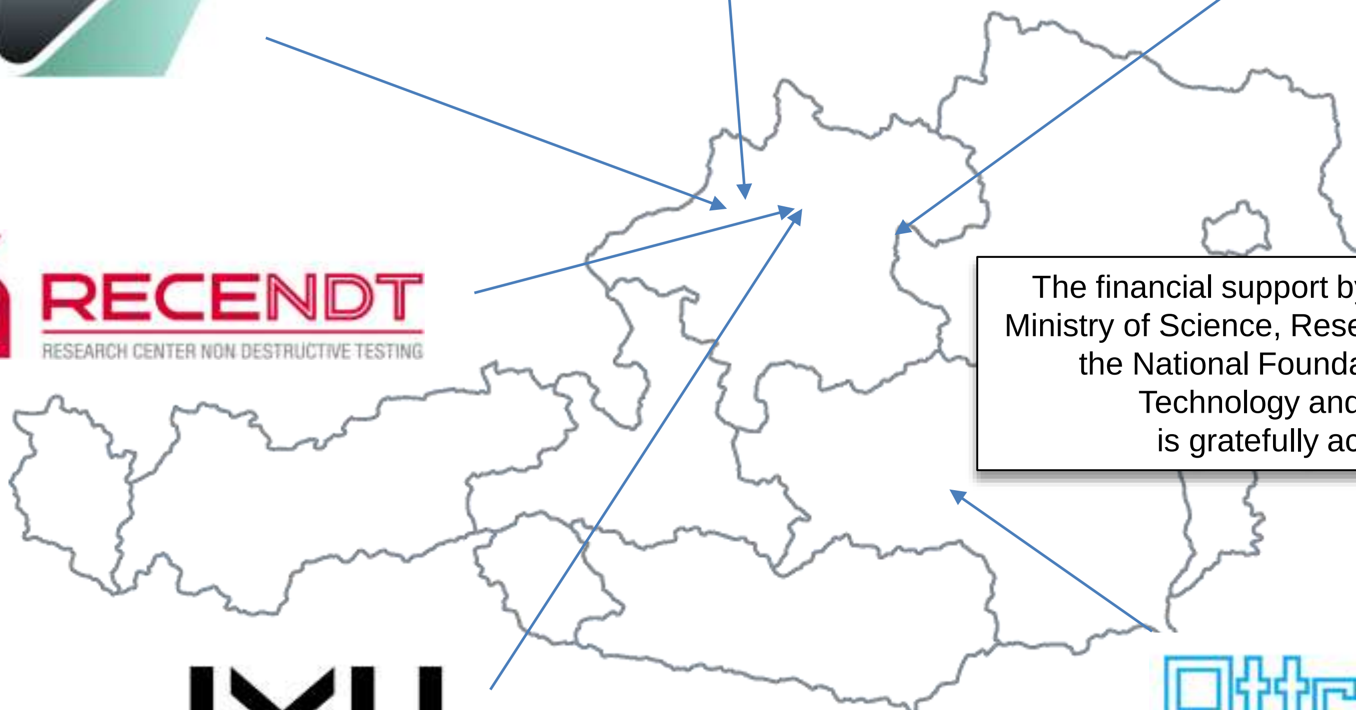
JOSEF RESSEL CENTER for THERMAL NDE of COMPOSITES

facc

fh OBERÖSTERREICH UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES UPPER AUSTRIA

ENGEL

RECENDT RESEARCH CENTER NON DESTRUCTIVE TESTING



The financial support by the Austrian Federal Ministry of Science, Research and Economy and the National Foundation for Research, Technology and Development is gratefully acknowledged.

JKU JOHANNES KEPLER UNIVERSITÄT LINZ

Ottronic Wir bewegen *innovativ*

fh OBERÖSTERREICH UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES UPPER AUSTRIA

Research Group of Thermography & NDT