

Ulf Hammerschmidt, PTB Braunschweig:

Neues von den Fritten

Poröse und tortuöse
Wärmetransportkoeffizienten

Inhalt

0. Material und Methode

1. ein unerwartetes Ergebnis

1.0 Erwartung

1.1 stattdessen, das erste Phänomen

1.2 vermutete systematische Abweichung

1.3 Fazit

2. *noch* ein unerwartetes Ergebnis

2.0 Erwartung

2.1 stattdessen, das zweite Phänomen

2.2 vermutete systematische Abweichung

2.3 Fazit

3. Konsequenzen

3.0 Erwartung und *mehr Fragen als Antworten*

3.1 (Teil-) Entwarnung für THW und THB

0. Material und Methode

Fritten (Glassiebe) sind geeignete thermophysikalische Modelle für homogene, isotrope und offen-poröse Zweistoff-Systeme.

Evakuierte Fritten sind thermophys. Modelle für die Matrix einer porösen Substanz.

Proben: Neun evakuierte (0,1 mbar) Fritten mit Porositäten zwischen 20 % und 48 % bei Porenradien zwischen 1 mm und 1 μm (Korngrößen $<10 \mu\text{m}$ bis 900 μm).

Das **THB-Verfahren** misst gleichzeitig die WLF ($u_\lambda = 3 \%$) und TLF ($u_a = 7 \%$). Die Eindringtiefe der Wärme ist mit 8,8 mm konstant; die Temperaturerhöhung von max. 1,8 K sehr gering. Eine Messung dauert etwa 2 min.

Die **Messtemperatur** beträgt 23 $^\circ\text{C}$.

1. ein unerwartetes Ergebnis



1.0 Erwartung

Ziel: Miss die WLF von evakuierten Fritten als Funktion der Porosität.

Erwartung:

(1) Die WLF ist lt. Def. eine **Materialkonstante**.

(2) Fritten sind aus Glas mit der WLF: $\lambda_G = 1,13 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

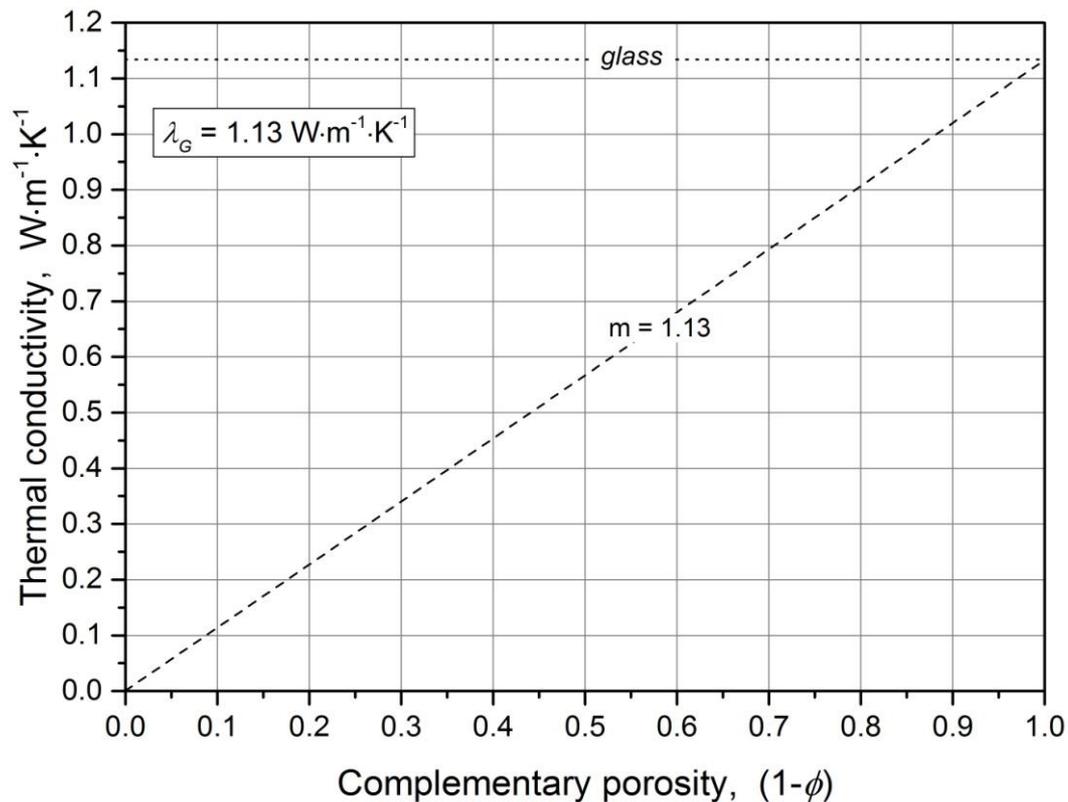
(3) evak. Fritten (Matrix) haben eine **effektive WLF**, die von ihrer Porosität ϕ abhängt, also $\lambda_M = \lambda_G(1-\phi)$.

(4) nach Korrektur erhält man die Materialkonstante:

$$\lambda_G = \lambda_M / (1-\phi)$$

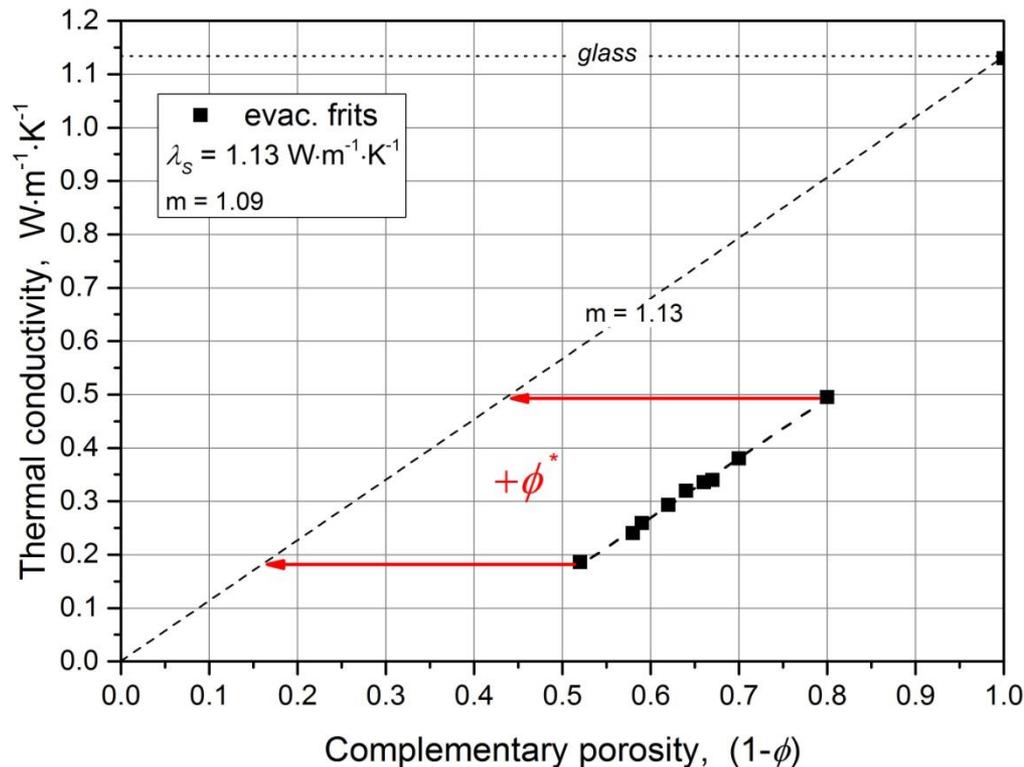
1.0 Erwartung

$$\lambda_M = \lambda_G (1 - \phi) = m(1 - \phi) \Rightarrow \lambda_G = 1/(1 - \phi) \cdot \lambda_M$$



1.1 Das erste Phänomen

$$\lambda_M = \lambda_G \left((1 - \phi) + \phi^* \right) \quad \text{mit } \phi^* = 35,1\% \quad !$$



1.2 vermutete systematische Messabweichung

Die **Korrektion** der verminderten Querschnittsfläche A_M statt A mit Hilfe der bekannten Porosität ϕ :

$$(1 - \phi) = 1 - \frac{V_P}{V} = \frac{V_M}{V} = \frac{A_M \cdot r}{A \cdot r} = \frac{A_M}{A} \quad \text{ist unvollständig. Besser ist}$$

$$1 - (\phi - \phi^*) = 1 - \frac{V_P - V_P^*}{V} = \frac{A_M - A_M^*}{A}.$$

Die **physikalische Bedeutung** der für die Wärmeleitung maßgeblichen Netto-Fläche $A_M - A_M^*$ ergibt sich aus der Existenz von „thermischen Sackgassen“ („Inseln“) mit der effektiven Querschnittsfläche A_M^* .

1.3 Fazit

REM-Aufnahme einer Fritte:



Fazit: Die Hg-porosimetrisch gemessene Porosität kann sich von der „thermisch-wirksamen“ Porosität unterscheiden.

2. noch ein unerwartetes Ergebnis



2.0 Erwartung

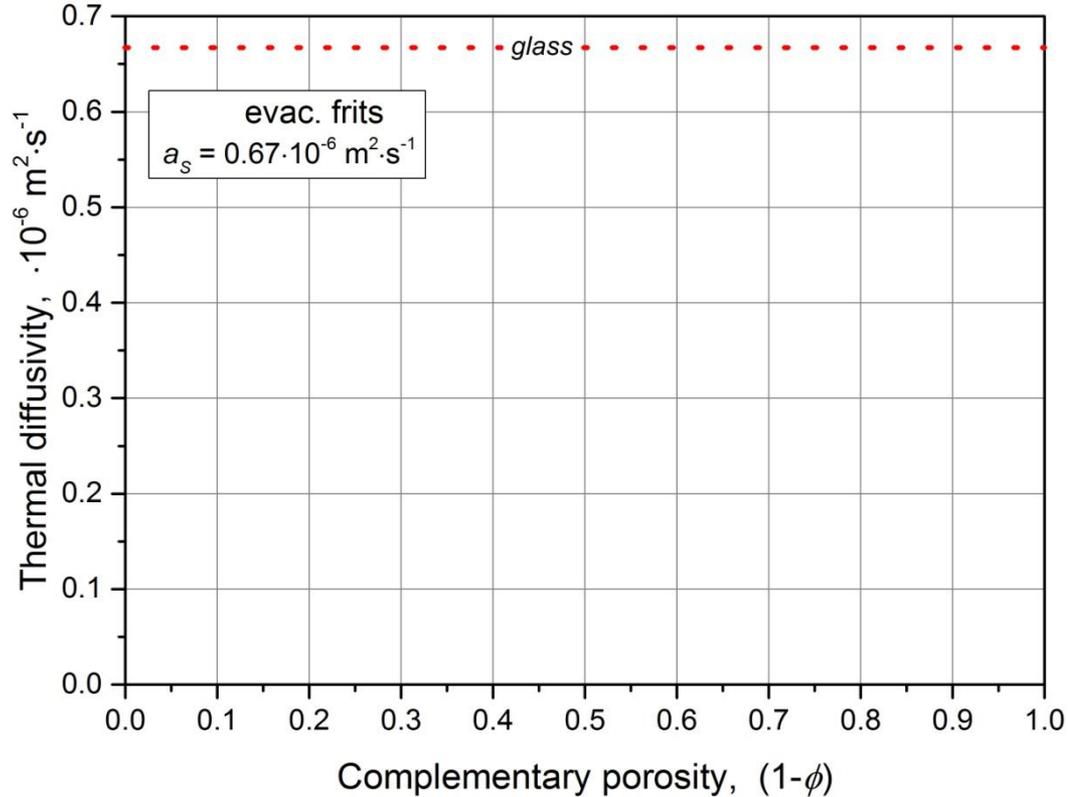
Ziel: Miss die TLF von evakuierten Fritten als Funktion der Porosität.

Erwartung:

- (1) Die TLF ist lt. Def. eine **Materialkonstante**. Sie beschreibt eine „Flächengeschwindigkeit“ der Wärmeausbreitung.
- (2) Fritten sind aus Glas mit der TLF: $a_G = 0,67 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$.
- (3) evak. Fritten (Matrix) haben eine **TLF**, die per def. **nicht** von der Porosität abhängt, also $a_M = a_G$.
- (4) **keine** Korrektur erforderlich.

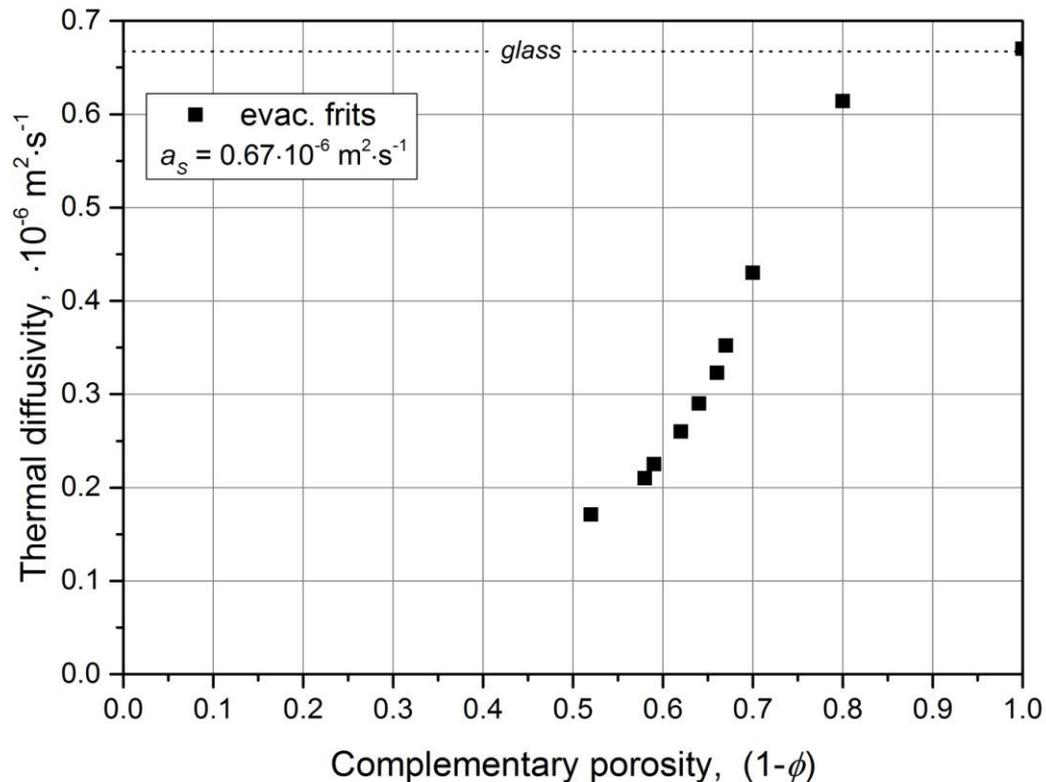
2.0 Erwartung

„Flächengeschwindigkeit“: $a = \frac{r^2}{F \cdot \Delta t} \Rightarrow a_M \equiv a_G$



2.1 Das zweite Phänomen

$a_M \neq a_G$ und *scheinbar*: $a_M = a_M (1 - \phi)$?



2.2 vermutete systematische Messabweichung

Die **Arbeitsgleichung** für a beschreibt die Laufzeit Δt eines Enthalpie-Impulses durch eine Probe mit der Dicke r :

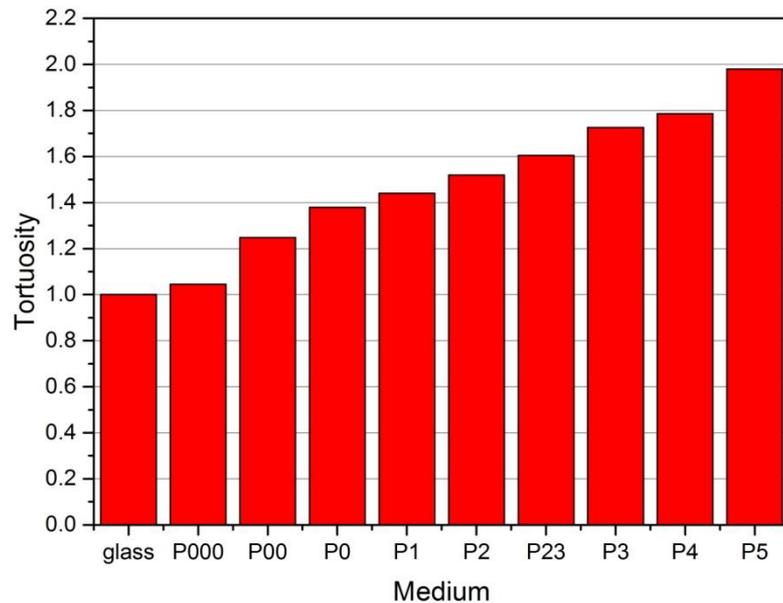
$$a = \frac{r^2}{4 \cdot \Delta t} = \frac{Cr^2}{4} \exp\left(\frac{n}{m}\right) \quad \{\text{THP} = \text{THW}, \text{THB}\}$$

Wenn die Messwerte für a_M kleiner sind als der Erwartungswert a , dann muss der **thermische Weg** durch die Probe R länger sein, als deren gemessene Dicke r . Die **Tortuosität**

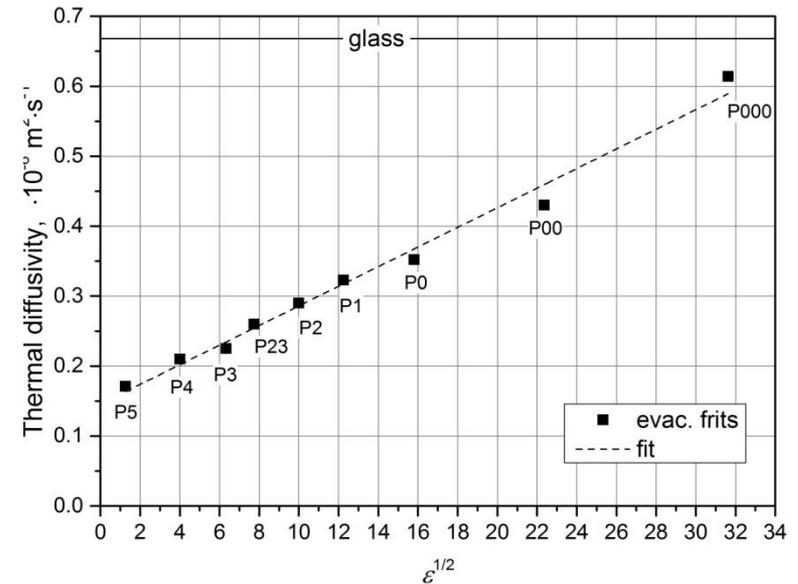
$$\tau = \frac{R}{r} \geq 1$$

beschreibt das Verhältnis der beiden Längen, so dass $R = \tau \cdot r$

2.3 Fazit



elektrisches Analogon



ε : Korngröße

Fazit: Die vollständige Arbeitsgleichung für die TLF lautet:

$$a^* = \frac{(\tau r)^2}{4 \cdot \Delta t} \quad \text{bzw.}$$

$$a^* = \frac{C(\tau r)^2}{4} \exp\left(\frac{n}{m}\right)$$

3. Konsequenzen



3.0 Erwartung

Folgerungen:

- (1) Wenn der thermische Weg $\tau \cdot r$ („Serpentine“) länger ist als die Dicke der Probe r , dann sollte sich diese Besonderheit auch auf die Messung der WLF auswirken; denn:

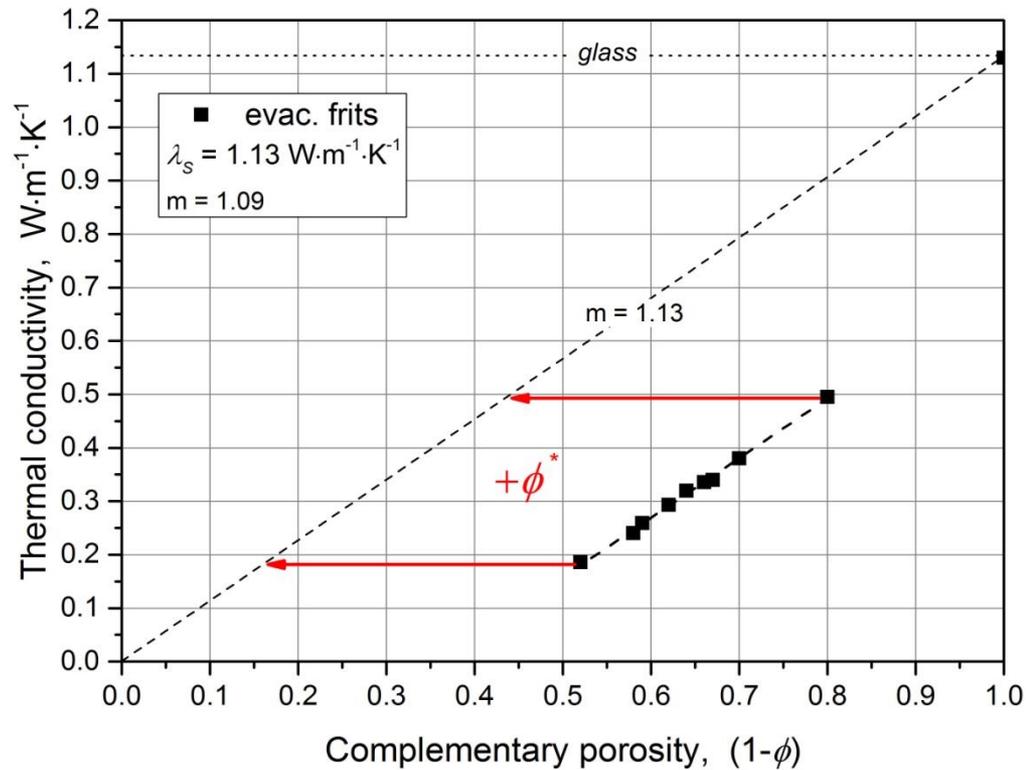
$$\lambda = \frac{\Phi}{A} \left(\frac{\Delta T}{\Delta r} \right)^{-1} \rightarrow \lambda^* = \frac{\Phi}{A_M^*} \left(\frac{\Delta T}{\Delta r} \right)^{-1} \rightarrow \lambda^{**} = \frac{\Phi}{A_M^*} \left(\frac{\Delta T}{\tau \Delta r} \right)^{-1} .$$

- (2) Wenn anstelle der Materialkonstanten a und λ die effektiven Größen a^* und λ^* oder λ^{**} gemessen werden, was wird dann aus der **Definitionsgleichung** für die TLF:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_P} ?$$

3.1 Entwarnung (!) für THW und THB

. . . sind nun diese WLF-Messwerte etwa falsch ?



3.1 Entwarnung (!) für THW und THB

Nein, weil im Gegensatz zu anderen Messverfahren (GHP, GHF, ...) speziell für THW und THB gilt:

$$\Delta T \approx \frac{\Phi}{4\pi L \lambda} \ln\left(\frac{4at}{Cr^2}\right) = m \left(\ln(t) + \ln\left(\frac{4a}{Cr^2}\right) \right) = m(\ln(t) + n)$$

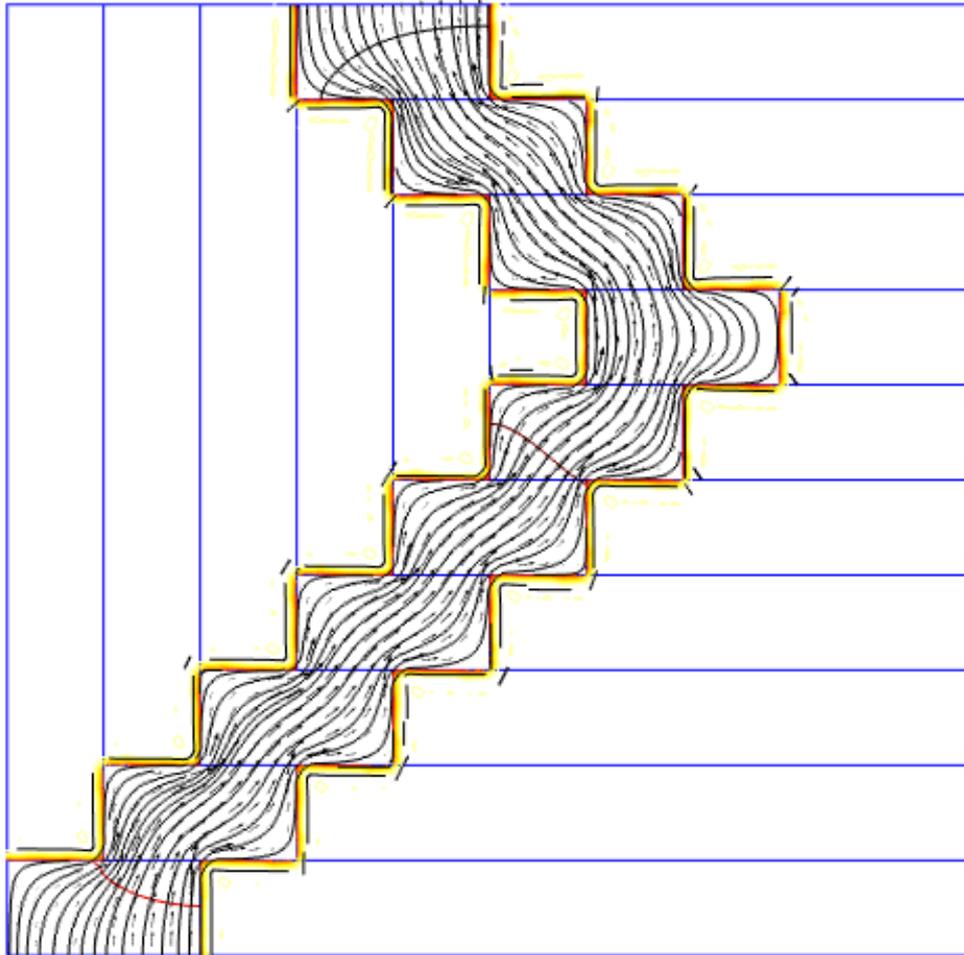
$$\Rightarrow \lambda = \frac{\Phi}{4\pi L m}$$

$$a = \frac{Cr^2}{4} \exp\left(\frac{n}{m}\right).$$

Hier wurde die **Orts**abhängigkeit (r) von der **Zeit**abhängigkeit (t) separiert !

$T = 278 \text{ K}$

$\tau = 2,23$



$T = 273 \text{ K}$

1.1 Methode / Messgerät

Anzeige 1: „Wärmeleitfähigkeit“ +/- „ISO Unsicherheit“

Anzeige 2: „Temperaturleitfähigkeit“ +/- „ISO Unsicherheit“



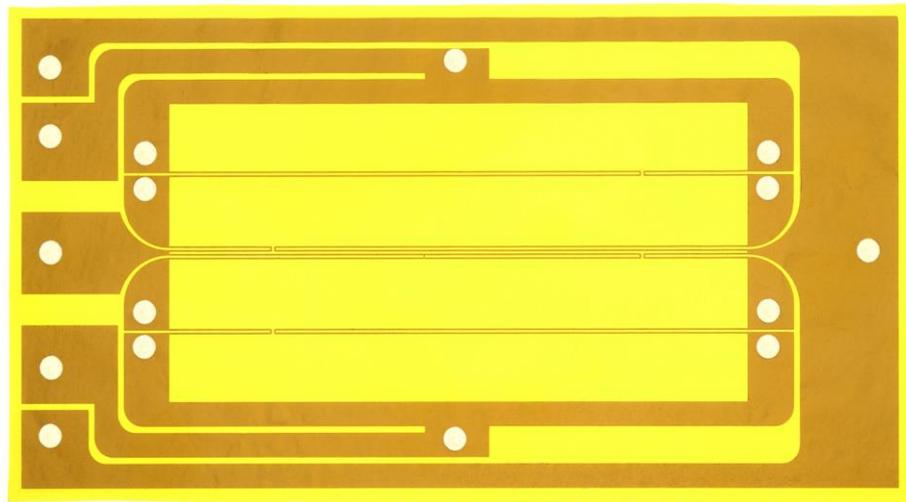
1.1 Material

Klasse	Porengröße in μm	Porosität in %
P000	1000 . . . 500	22
P00	250 . . . 500	30
P0	160 . . . 250	33
P1	100 . . . 160	34
P2	40 . . . 100	36
P23	40 . . . 60	44
P3	16 . . . 40	41
P4	10 . . . 16	42
P5	1,0 . . . 1,6	48

1.1 Methode / Messgerät / Sensor

Vorteile des Transient-Hot-Bridge-Verfahrens

- ▶ **simultane Messung von WLF und TLF**
- ▶ schnelle Messung (1 bis 2 min.)
- ▶ konstante Wärmeeindringtiefe (hier: 10 mm)
- ▶ geringer Temperaturanstieg (hier: 1.5 K)



1.1 Methode / Messaufbau

