

Bayerisches Zentrum für  
Angewandte Energieforschung e.V.

# Korrelation von Festkörperwärmeleitung und Steifigkeit bei Polyurea Aerogelen mit variabler Mikrostruktur

L.Weigold, F. Hemberger, K.Swimm, S. Vidi

Tagung des AK Thermophysik am 3./4. Mai 2012 in Graz

MIT SONNE UND VERSTAND.

© ZAE Bayern



**ZAE BAYERN**

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

# VORTRAGSÜBERSICHT

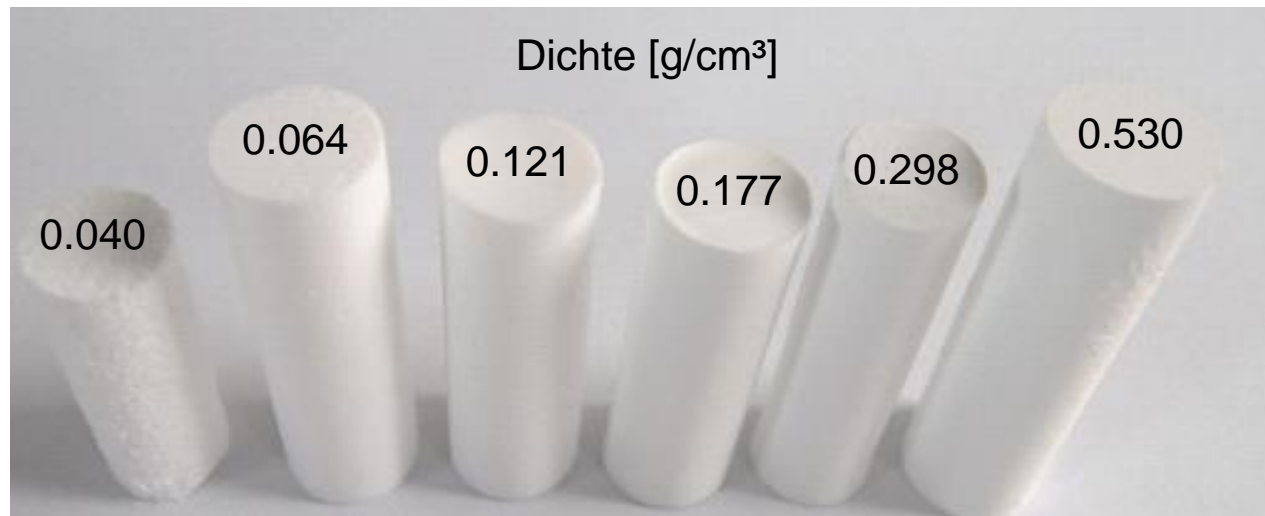


ZAE BAYERN

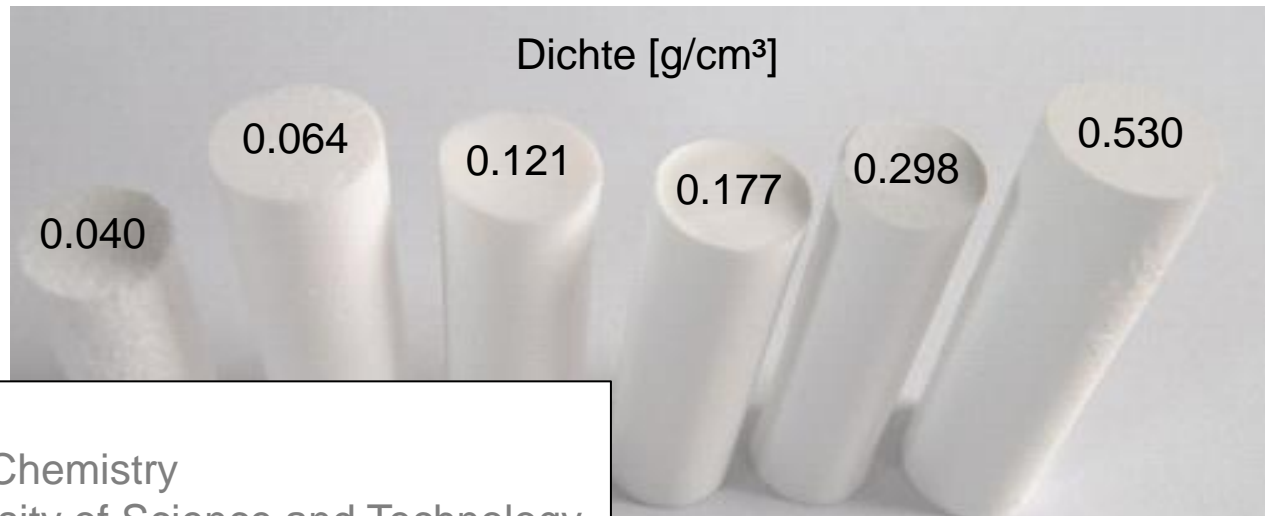
Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

1. Polyurea Aerogele (PUA Aerogele)
2. Festkörperwärmeleitfähigkeit  $\lambda_{\text{solid}}$   
Messmethode  
Messwerte PUA Aerogele
3. Steifigkeit  $c_{11}$   
Messmethode  
Messwerte PUA Aerogele
4. Korrelation  $c_{11}$  und  $\lambda_{\text{solid}}$

## Polyurea Aerogle (PUA Aerogele)



## Polyurea Aerogle (PUA Aerogele)



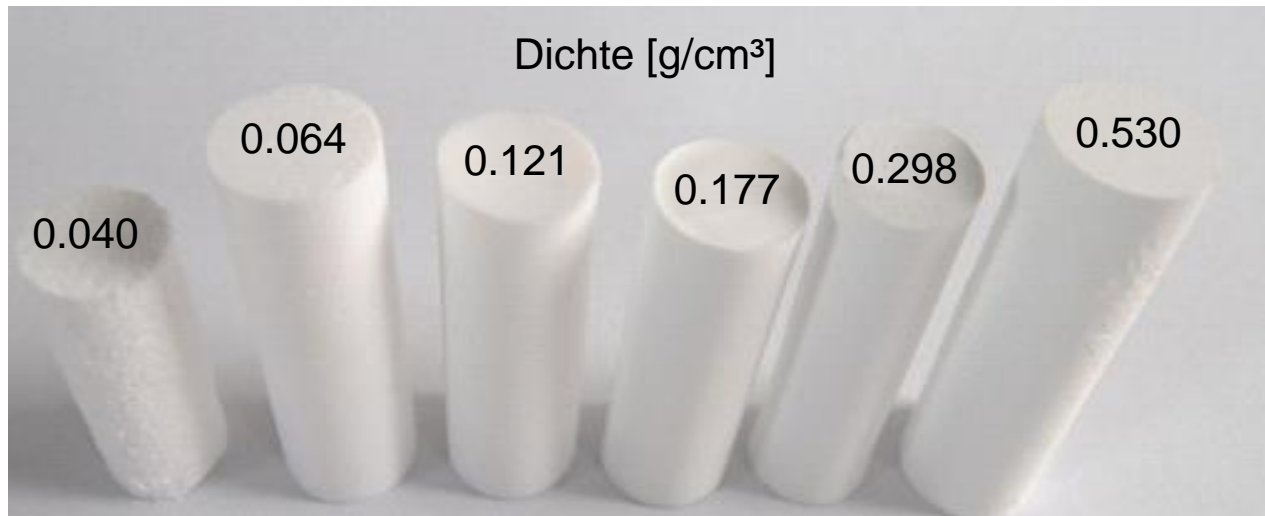
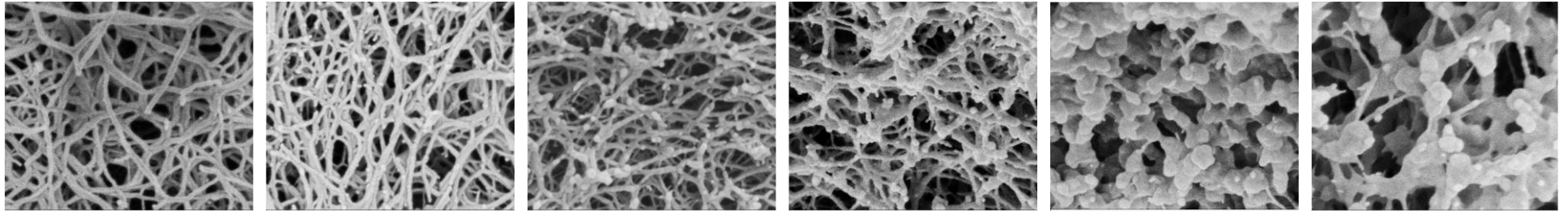
Prof. Leventis  
Department of Chemistry  
Missouri University of Science and Technology  
Rolla, U.S.A.

# PUA AEROGELE



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

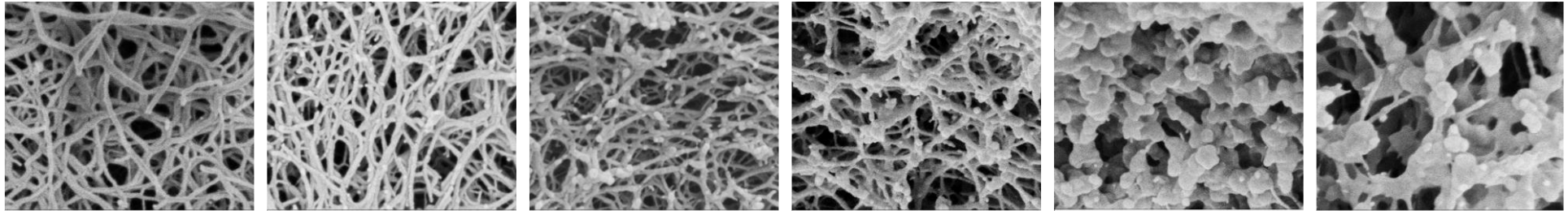


# PUA AEROGELE

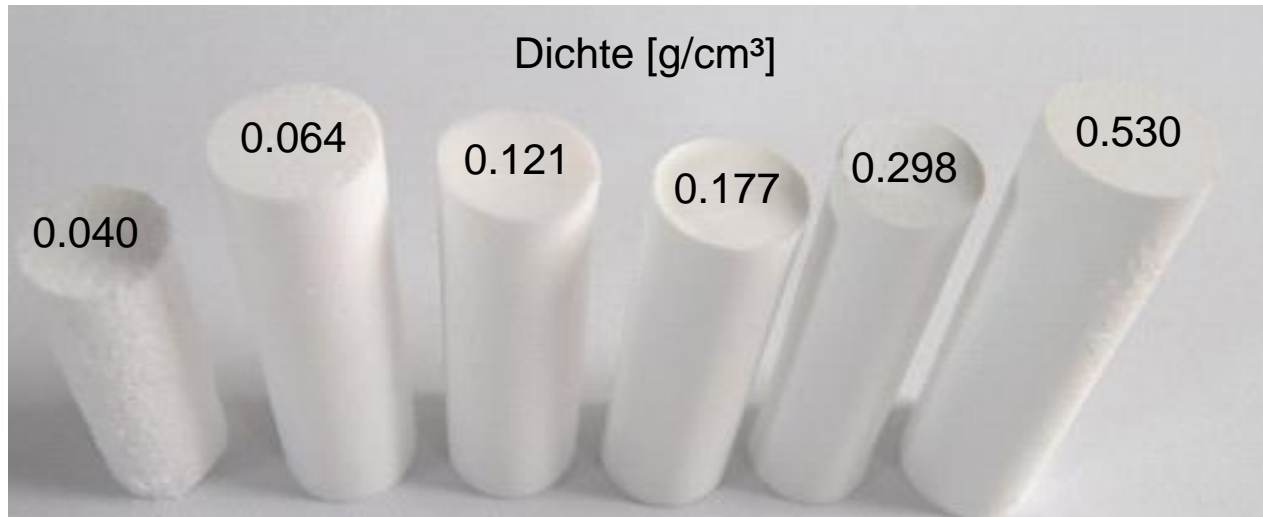
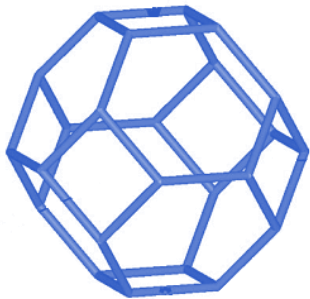


ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung



Mikrostruktur  
Schaum

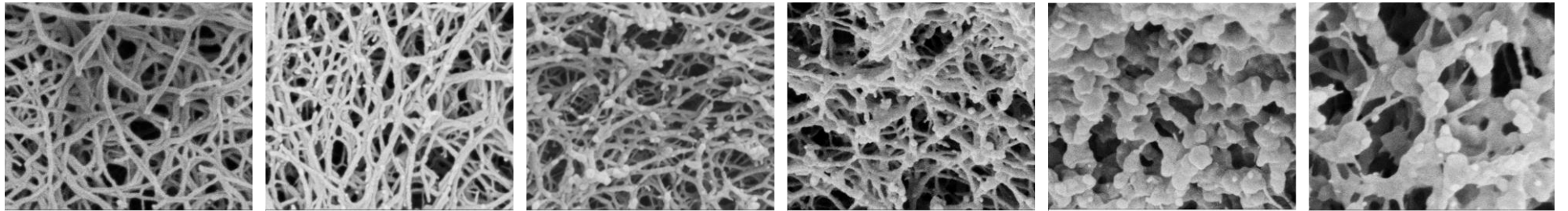


# PUA AEROGELE

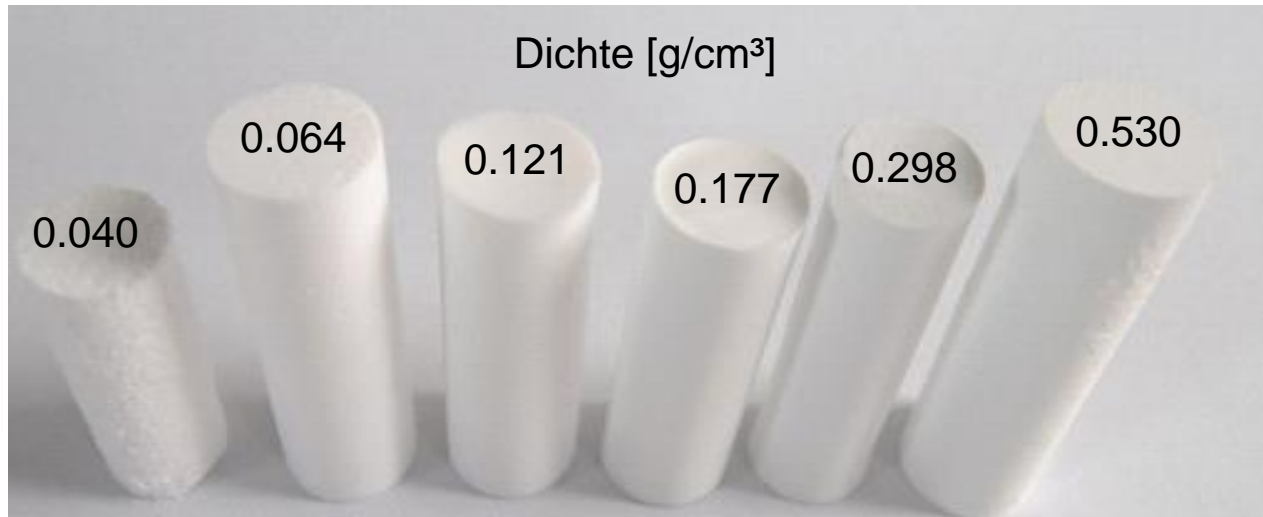
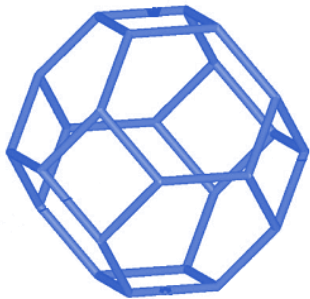


ZAE BAYERN

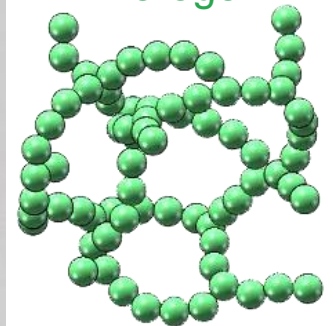
Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung



Mikrostruktur  
Schaum



Mikrostruktur  
Aerogel



# WÄRMELEITUNG: HITZDRAHTMESSUNG



**ZAE BAYERN**

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung



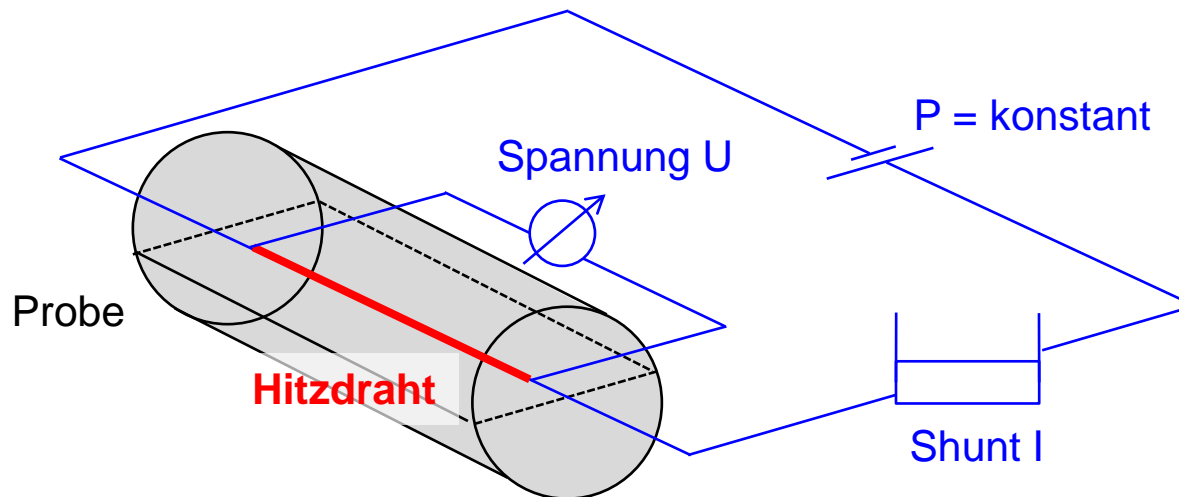
# WÄRMELEITUNG: HITZDRAHTMESSUNG



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

Hitzdrahtmethode



# WÄRMELEITUNG: HITZDRAHTMESSUNG

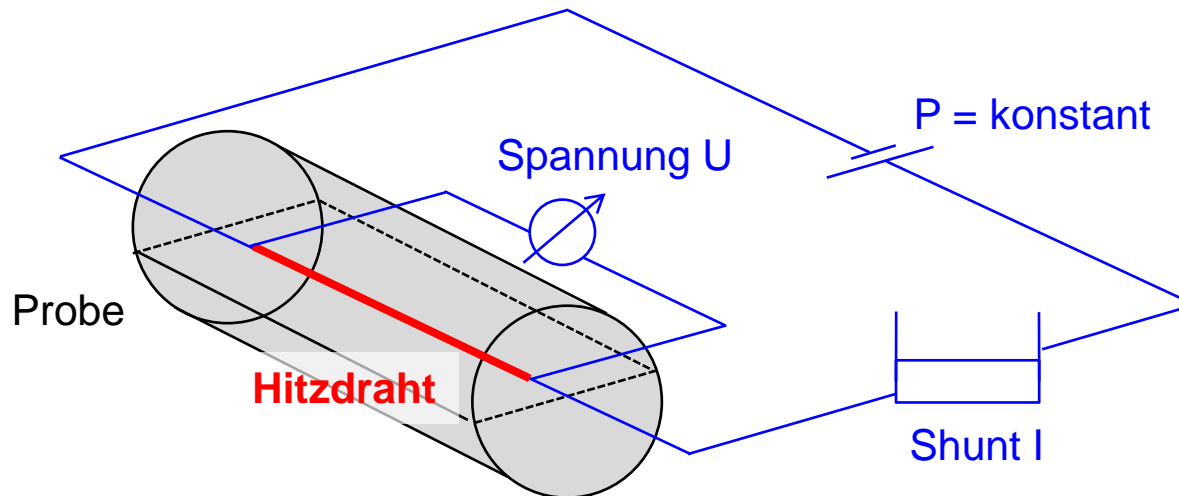


ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

$$\lambda_{\text{total}} = \lambda_{\text{solid}} + \lambda_{\text{rad}} + \lambda_{\text{gas}}$$

Hitzdrahtmethode



# WÄRMELEITUNG: MESSERGEBNISSE

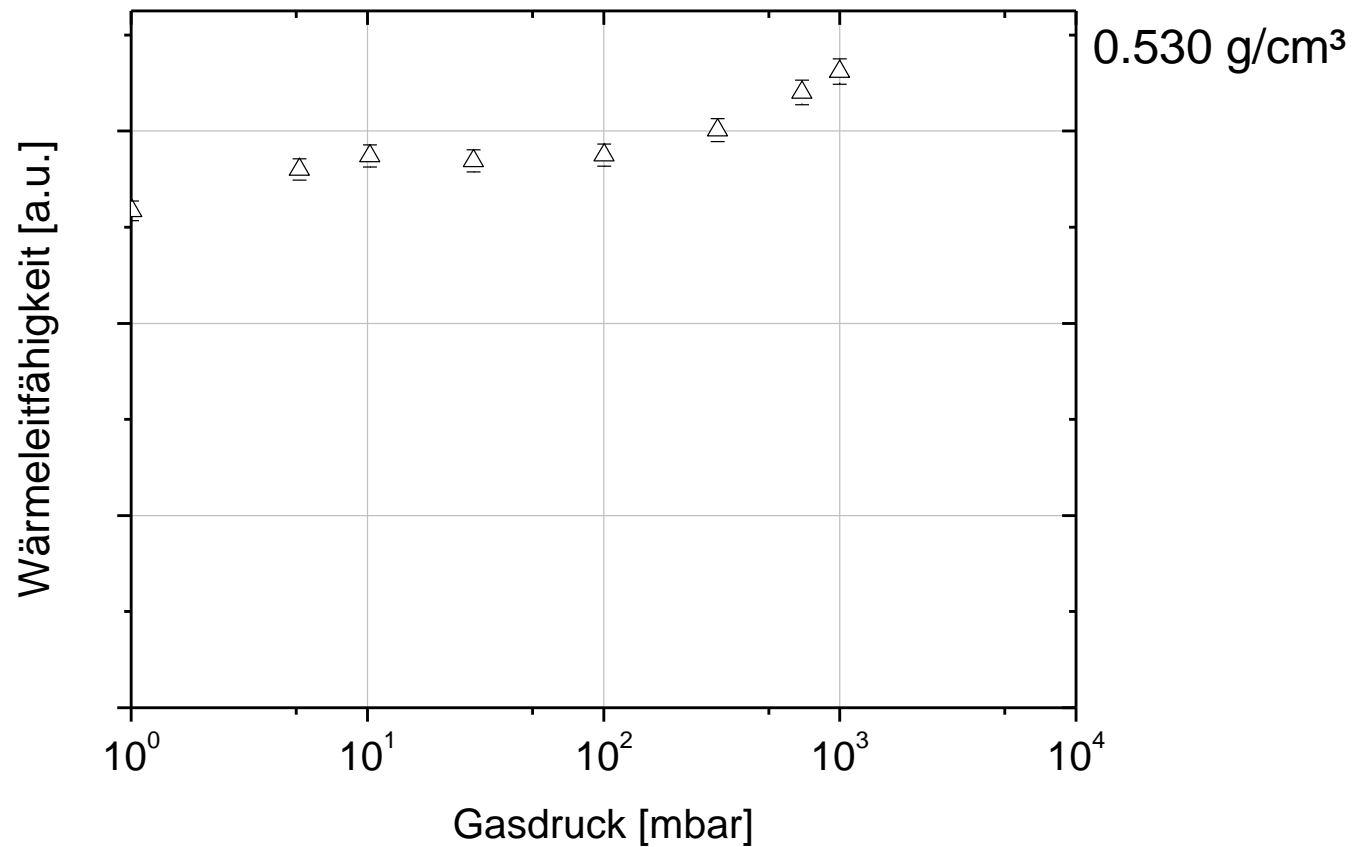


ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

$$\lambda_{\text{total}} = \lambda_{\text{solid}} + \lambda_{\text{rad}} + \lambda_{\text{gas}}$$

Gasdruckabhängige Hitzdrahtmessungen



# WÄRMELEITUNG: MESSERGEBNISSE



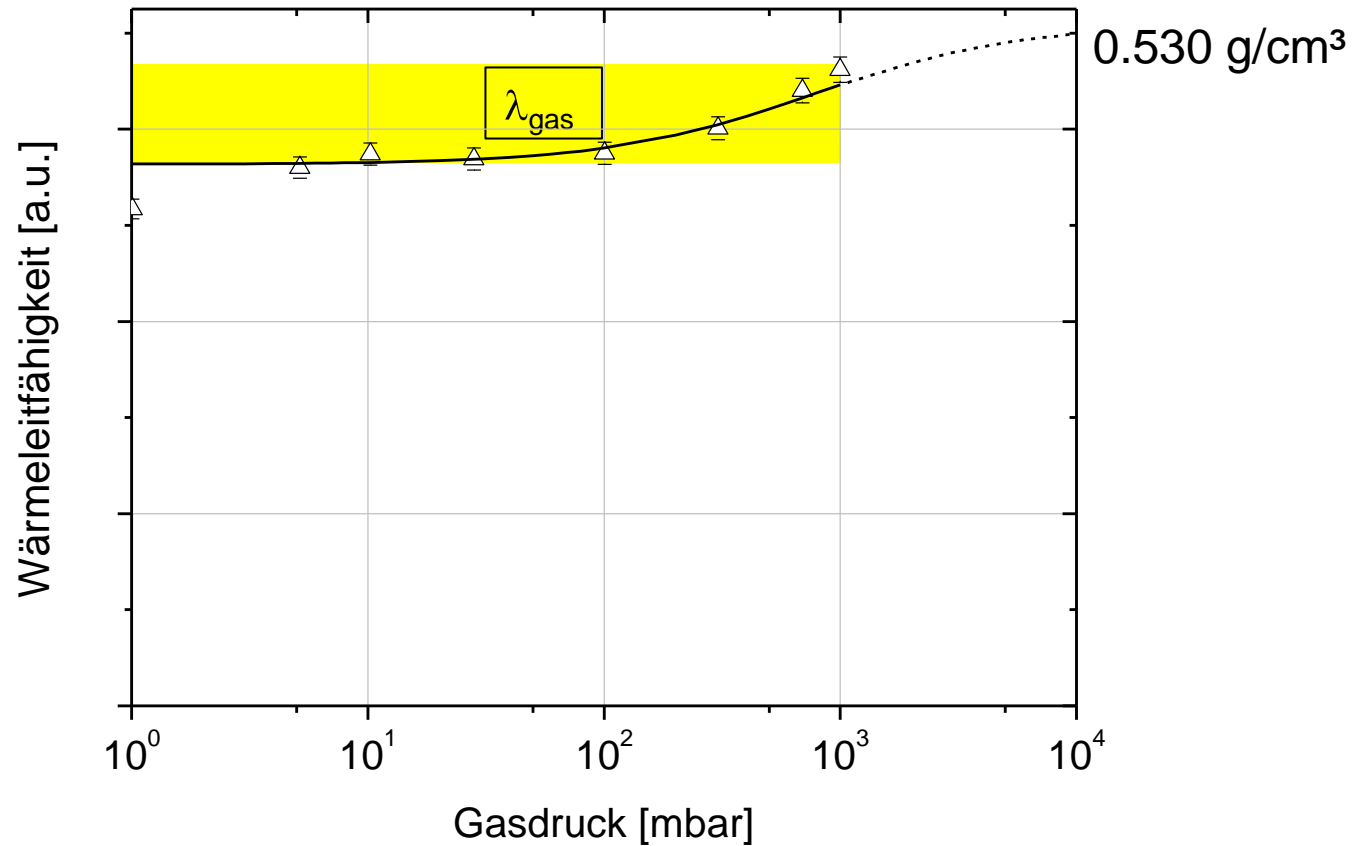
ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

$$\lambda_{\text{total}} = \lambda_{\text{solid}} + \lambda_{\text{rad}} + \lambda_{\text{gas}}$$

Gasdruckabhängige Hitzdrahtmessungen

$$\lambda_{\text{gas}} = \frac{\lambda_0 \Phi}{1 + 2\beta \frac{l_m}{d} \frac{p}{p_0}}$$



# WÄRMELEITUNG: MESSERGEBNISSE



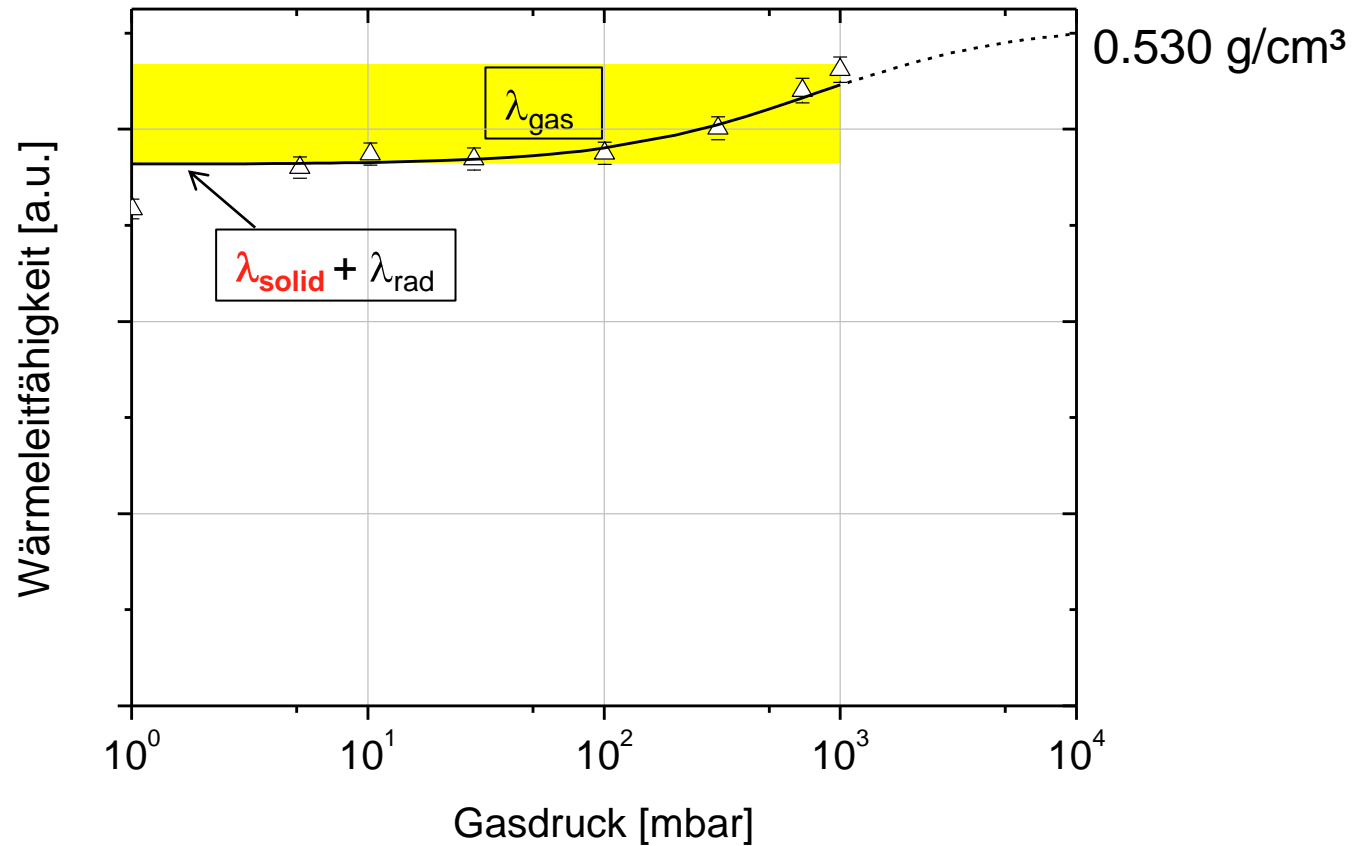
ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

$$\lambda_{\text{total}} = \lambda_{\text{solid}} + \lambda_{\text{rad}} + \lambda_{\text{gas}}$$

Gasdruckabhängige Hitzdrahtmessungen

$$\lambda_{\text{gas}} = \frac{\lambda_0 \Phi}{1 + 2\beta \frac{l_m}{d} \frac{p}{p_0}}$$



# WÄRMELEITUNG: MESSERGEBNISSE



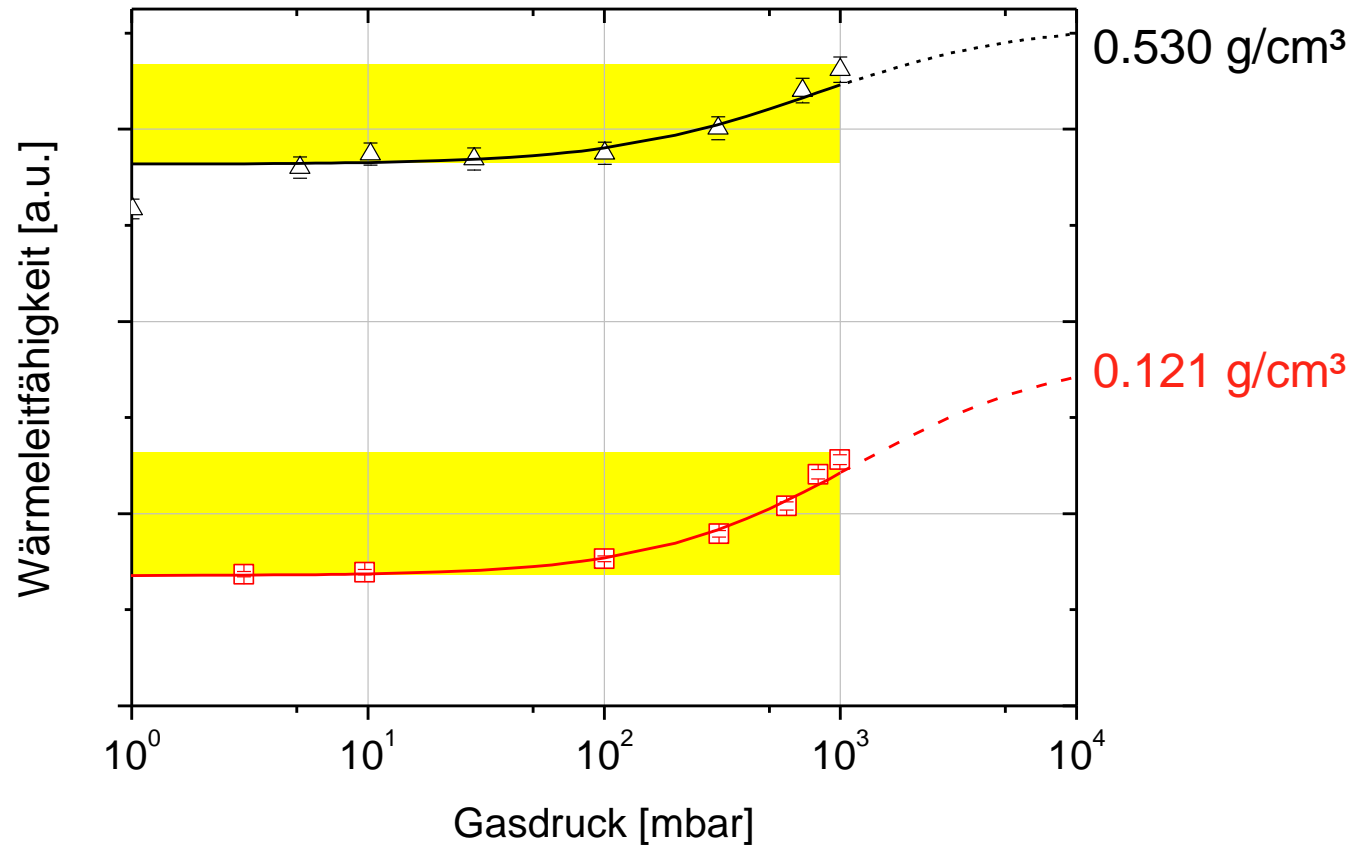
ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

$$\lambda_{\text{total}} = \lambda_{\text{solid}} + \lambda_{\text{rad}} + \lambda_{\text{gas}}$$

Gasdruckabhängige Hitzdrahtmessungen

$$\lambda_{\text{gas}} = \frac{\lambda_0 \Phi}{1 + 2\beta \frac{l_m}{d} \frac{p}{p_0}}$$



# WÄRMELEITUNG: MESSERGEBNISSE

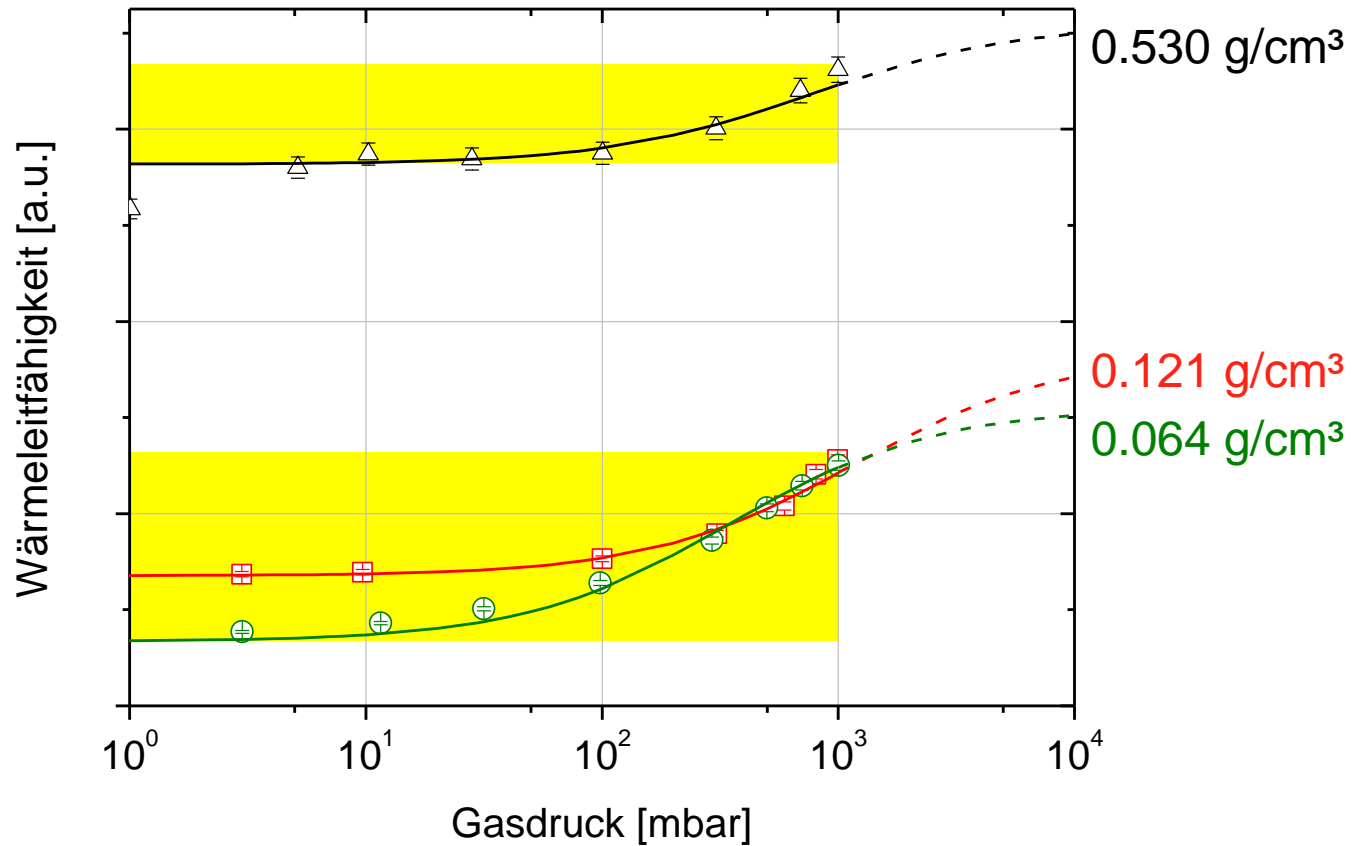


ZAE BAYERN  
Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

$$\lambda_{\text{total}} = \lambda_{\text{solid}} + \lambda_{\text{rad}} + \lambda_{\text{gas}}$$

Gasdruckabhängige Hitzdrahtmessungen

$$\lambda_{\text{gas}} = \frac{\lambda_0 \Phi}{1 + 2\beta \frac{l_m}{d} \frac{p}{p_0}}$$



# WÄRMELEITUNG: MESSERGEBNISSE



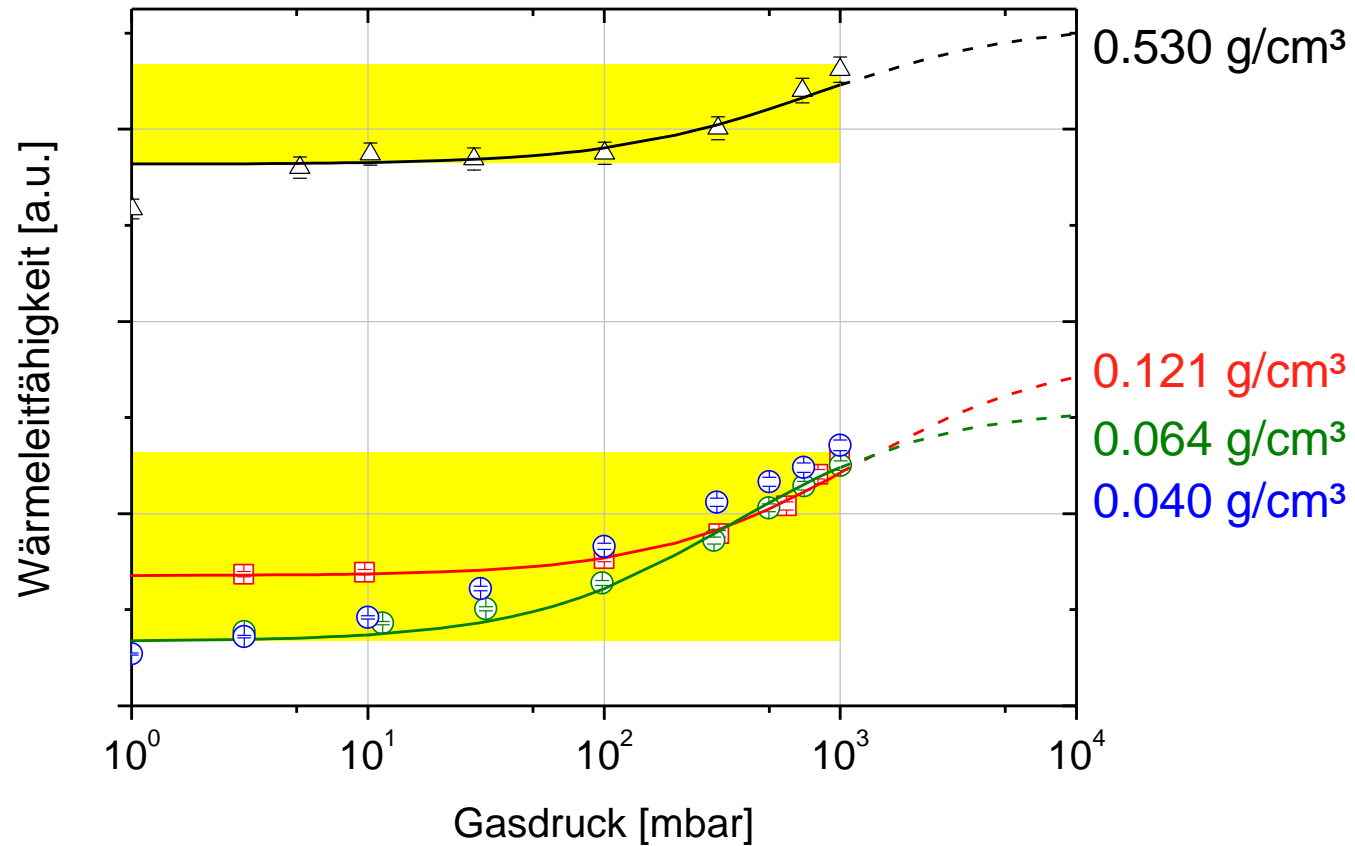
ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

$$\lambda_{\text{total}} = \lambda_{\text{solid}} + \lambda_{\text{rad}} + \lambda_{\text{gas}}$$

Gasdruckabhängige Hitzdrahtmessungen

$$\lambda_{\text{gas}} = \frac{\lambda_0 \Phi}{1 + 2\beta \frac{l_m}{d} \frac{p}{p_0}}$$





# WÄRMELEITUNG: MESSERGEBNISSE



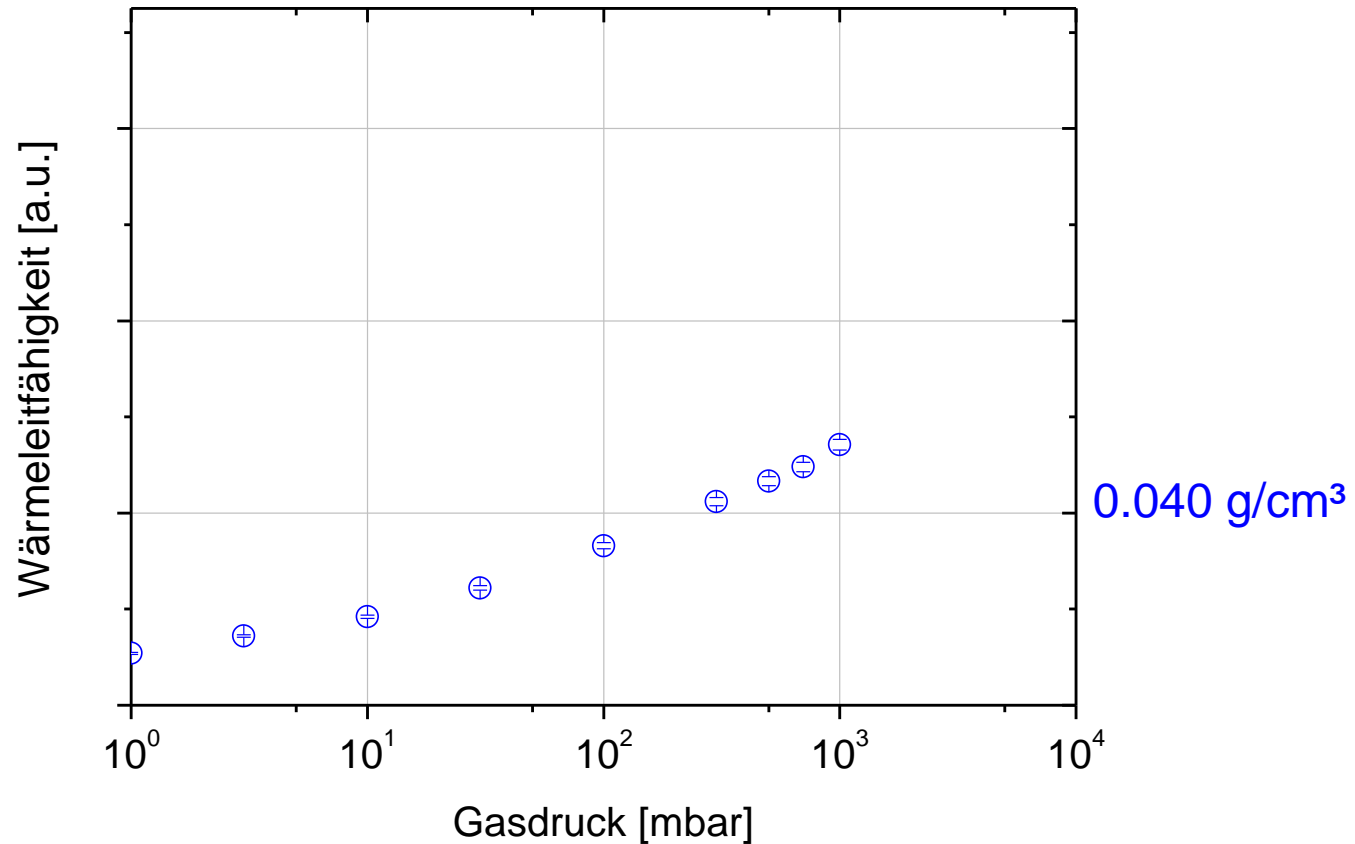
ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

$$\lambda_{\text{total}} = \lambda_{\text{solid}} + \lambda_{\text{rad}} + \lambda_{\text{gas}}$$

Gasdruckabhängige Hitzdrahtmessungen

$$\lambda_{\text{gas}} = \frac{\lambda_0 \Phi}{1 + 2\beta \frac{l_m}{d} \frac{p}{p_0}}$$



# WÄRMELEITUNG: MESSERGEBNISSE



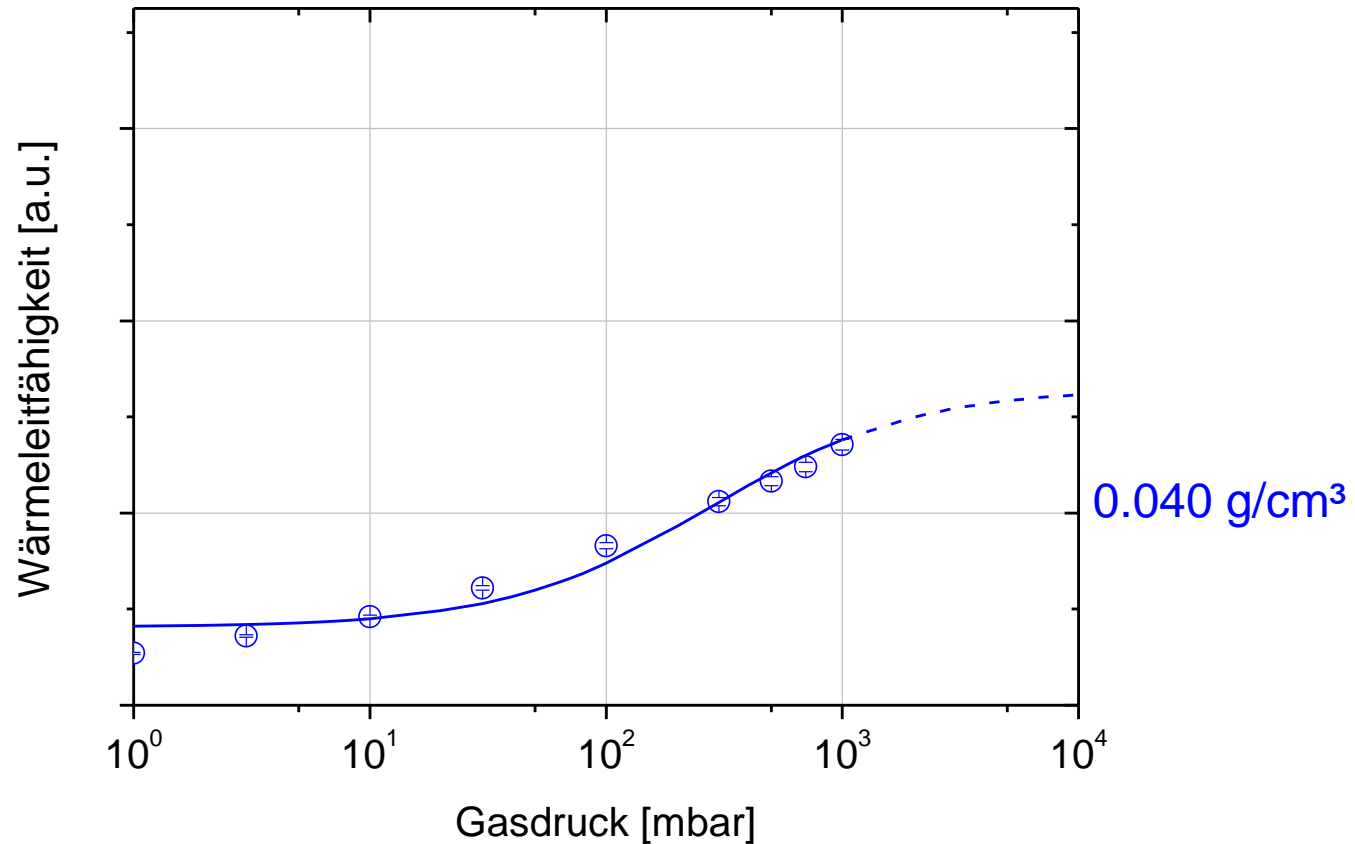
ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

$$\lambda_{\text{total}} = \lambda_{\text{solid}} + \lambda_{\text{rad}} + \lambda_{\text{gas}}$$

Gasdruckabhängige Hitzdrahtmessungen

$$\lambda_{\text{gas}} = \frac{\lambda_0 \Phi}{1 + 2\beta \frac{l_m}{d} \frac{p}{p_0}}$$



# WÄRMELEITUNG: MESSERGEBNISSE



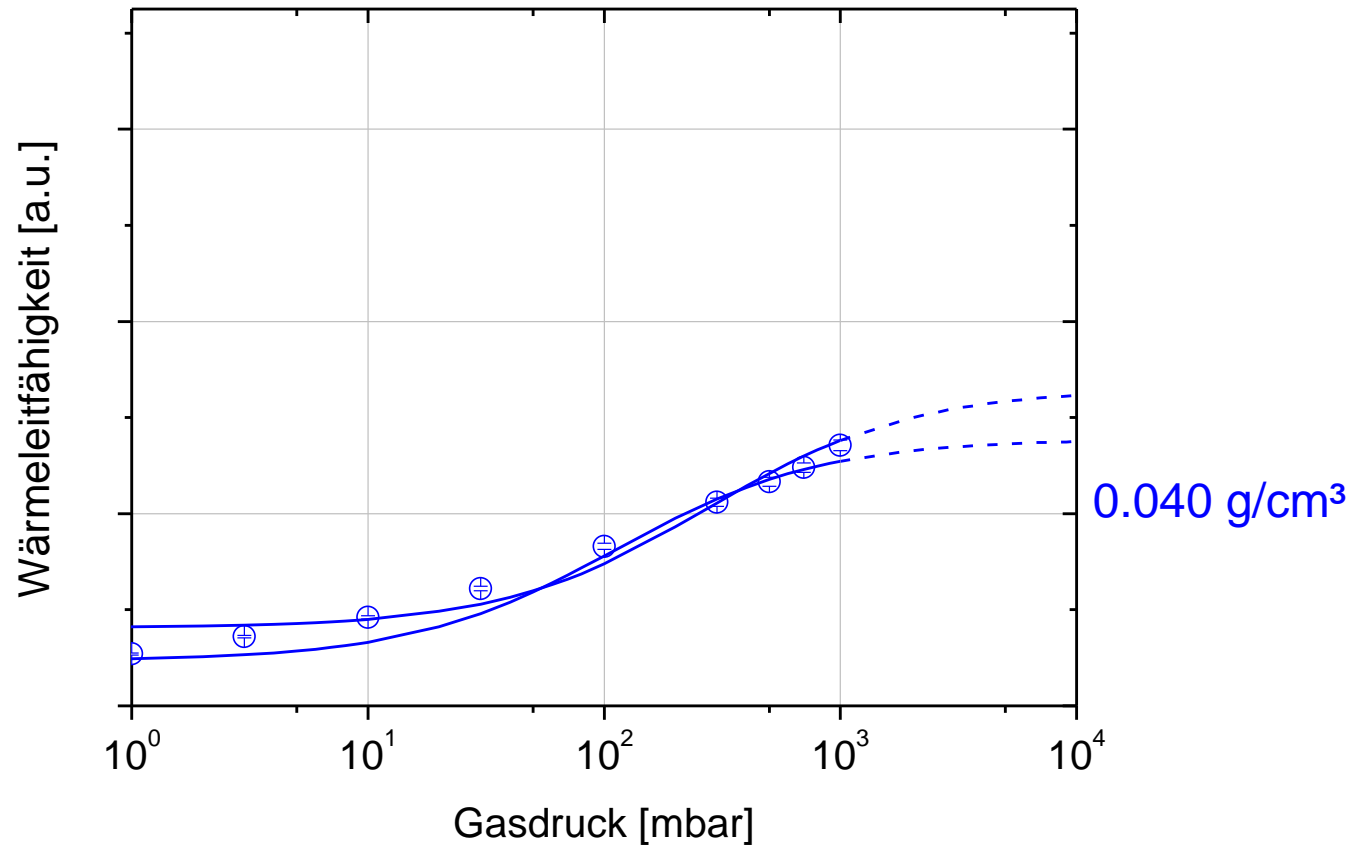
ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

$$\lambda_{\text{total}} = \lambda_{\text{solid}} + \lambda_{\text{rad}} + \lambda_{\text{gas}}$$

Gasdruckabhängige Hitzdrahtmessungen

$$\lambda_{\text{gas}} = \frac{\lambda_0 \Phi}{1 + 2\beta \frac{l_m}{d} \frac{p}{p_0}}$$



# WÄRMELEITUNG: MESSERGEBNISSE



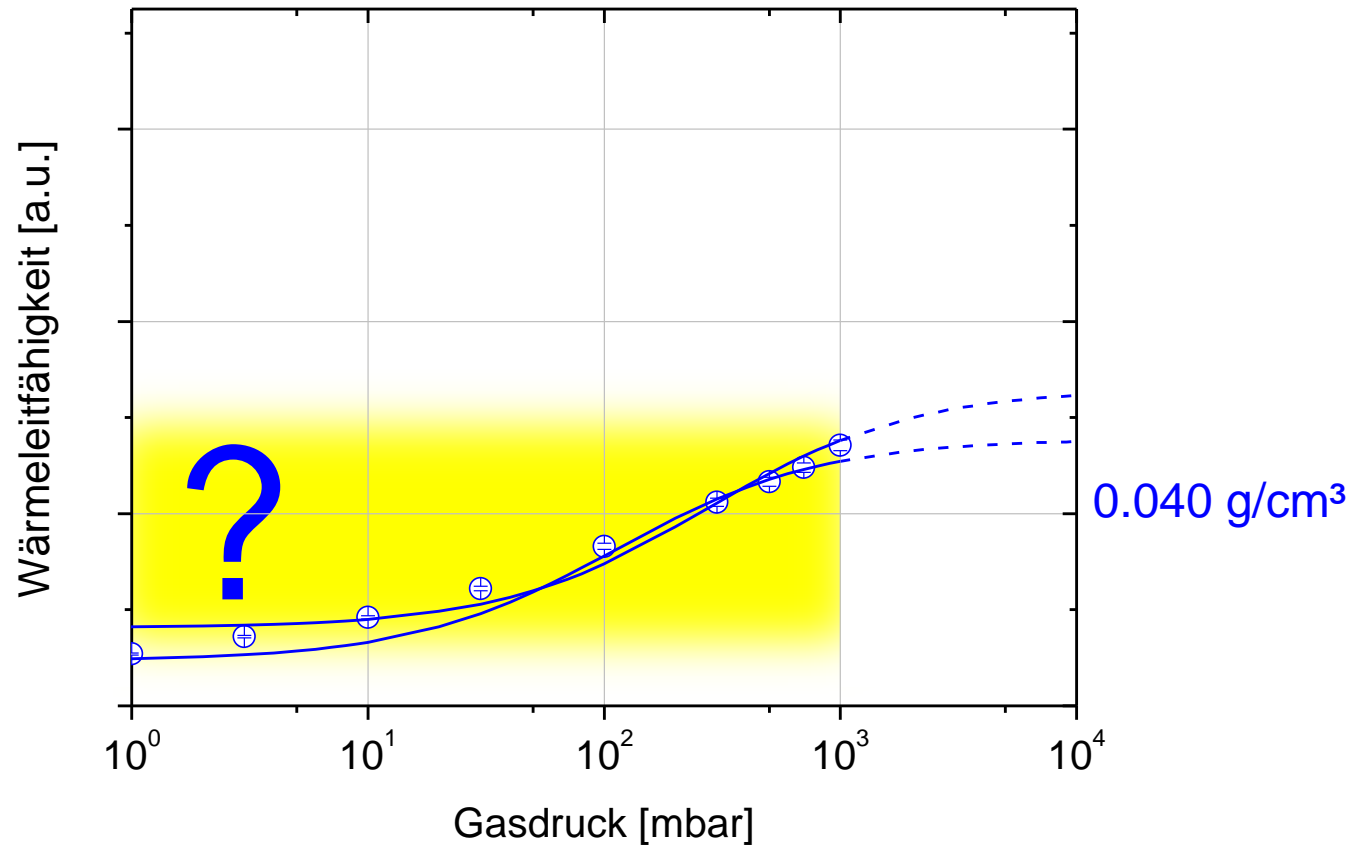
ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

$$\lambda_{\text{total}} = \lambda_{\text{solid}} + \lambda_{\text{rad}} + \lambda_{\text{gas}}$$

Gasdruckabhängige Hitzdrahtmessungen

$$\lambda_{\text{gas}} = \frac{\lambda_0 \Phi}{1 + 2\beta \frac{l_m}{d} \frac{p}{p_0}}$$



# WÄRMELEITUNG: MESSERGEBNISSE

$$\lambda_{\text{total}} = \lambda_{\text{solid}} + \lambda_{\text{rad}} + \lambda_{\text{gas}}$$



**ZAE BAYERN**

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

# WÄRMELEITUNG: MESSERGEBNISSE

$$\lambda_{\text{total}} = \lambda_{\text{solid}} + \lambda_{\text{rad}} + \lambda_{\text{gas}}$$



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

# WÄRMELEITUNG: MESSERGEBNISSE

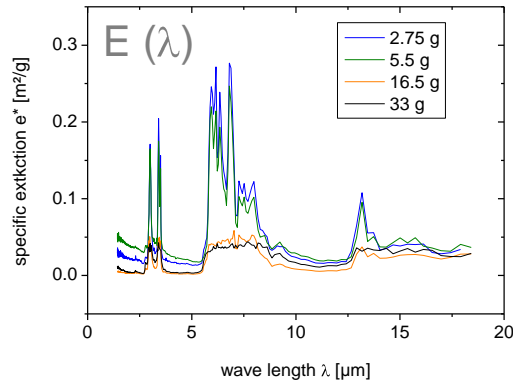


ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

$$\lambda_{\text{total}} = \lambda_{\text{solid}} + \lambda_{\text{rad}} + \lambda_{\text{gas}}$$

## Diffusiver Strahlungswärmtransport



$$\lambda_{\text{rad, diff}} = \frac{16 n^2 \sigma T^3}{3 E}$$

# WÄRMELEITUNG: MESSERGEBNISSE

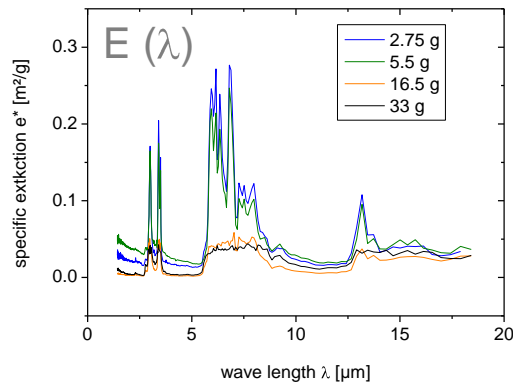


ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

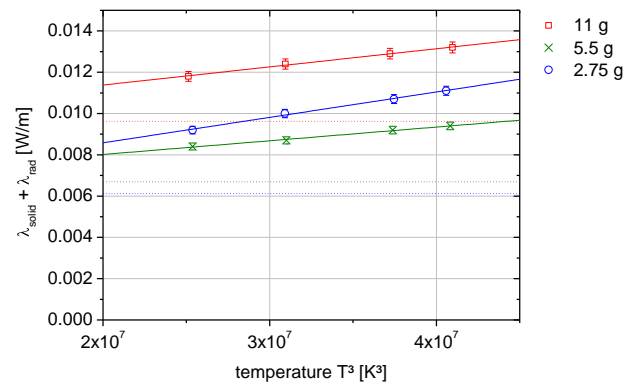
$$\lambda_{\text{total}} = \lambda_{\text{solid}} + \lambda_{\text{rad}} + \lambda_{\text{gas}}$$

## Diffusiver Strahlungswärmetransport



$$\lambda_{\text{rad, diff}} = \frac{16 n^2 \sigma T^3}{3 E}$$

## Temperaturabhängige Hitzdrahtmessungen



$$\lambda_{\text{rad}} \propto T^3$$



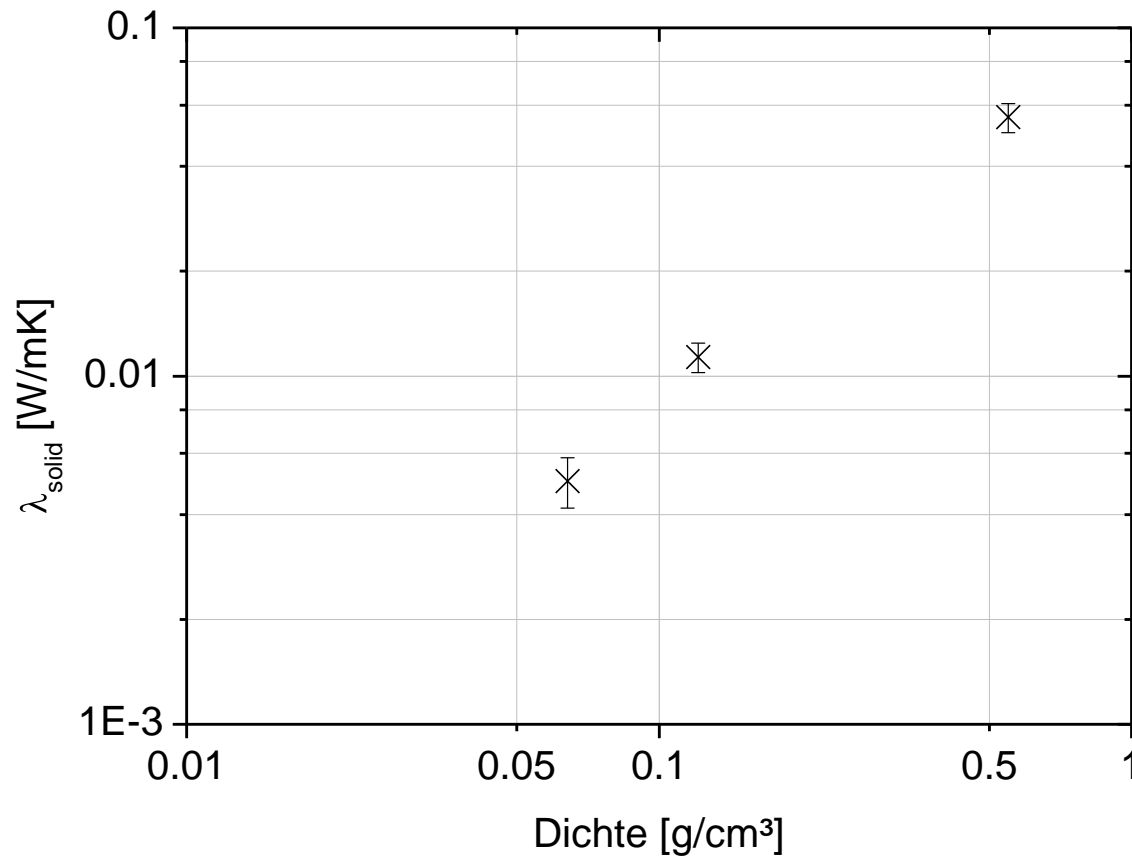
# FESTKÖRPERWÄRMELEITUNG



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

$$\lambda_{\text{total}} = \lambda_{\text{solid}} + \lambda_{\text{rad}} + \lambda_{\text{gas}}$$



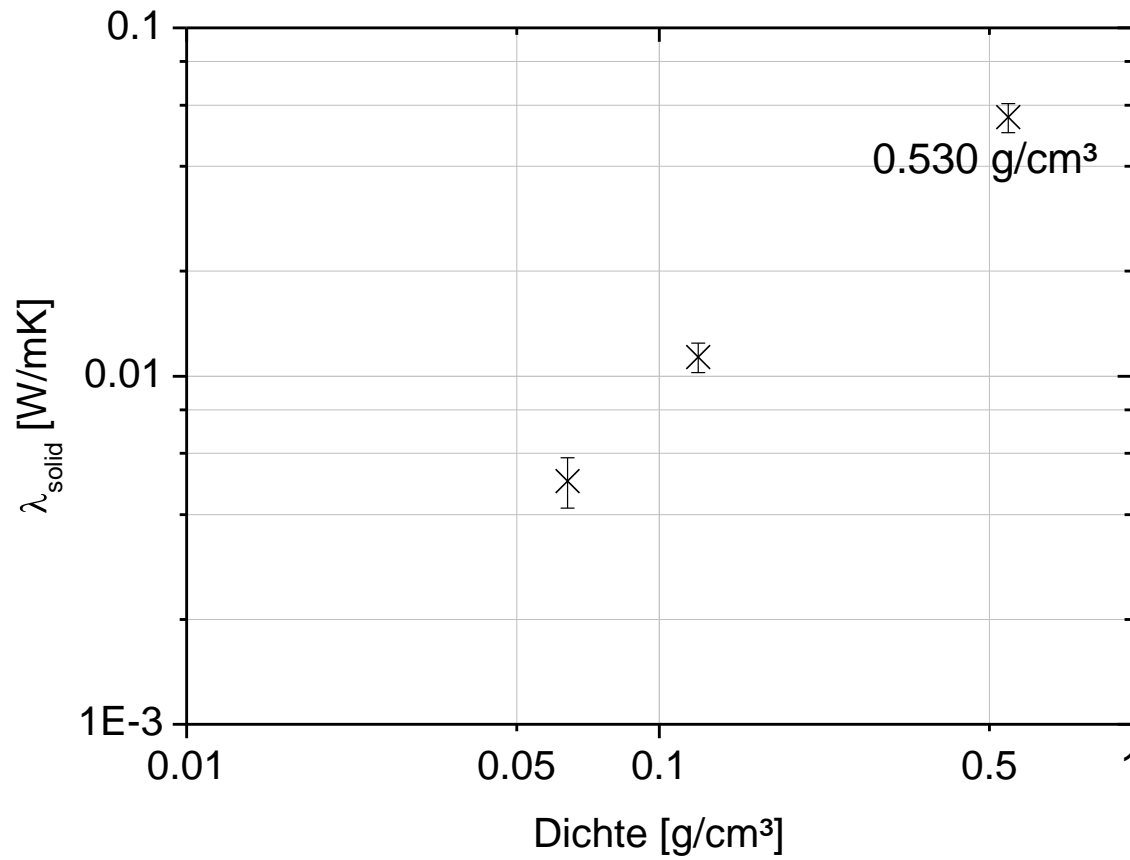
# FESTKÖRPERWÄRMELEITUNG



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

$$\lambda_{\text{total}} = \lambda_{\text{solid}} + \lambda_{\text{rad}} + \lambda_{\text{gas}}$$



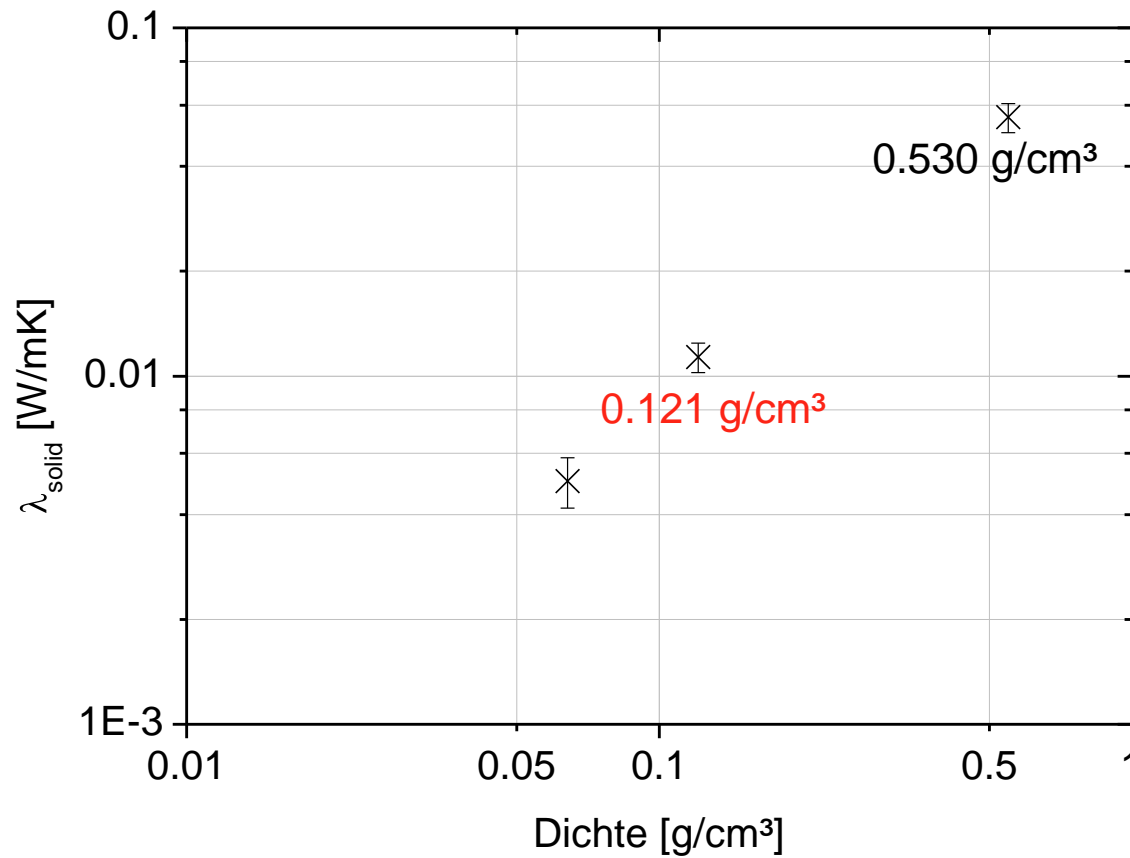
# FESTKÖRPERWÄRMELEITUNG



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

$$\lambda_{\text{total}} = \lambda_{\text{solid}} + \lambda_{\text{rad}} + \lambda_{\text{gas}}$$



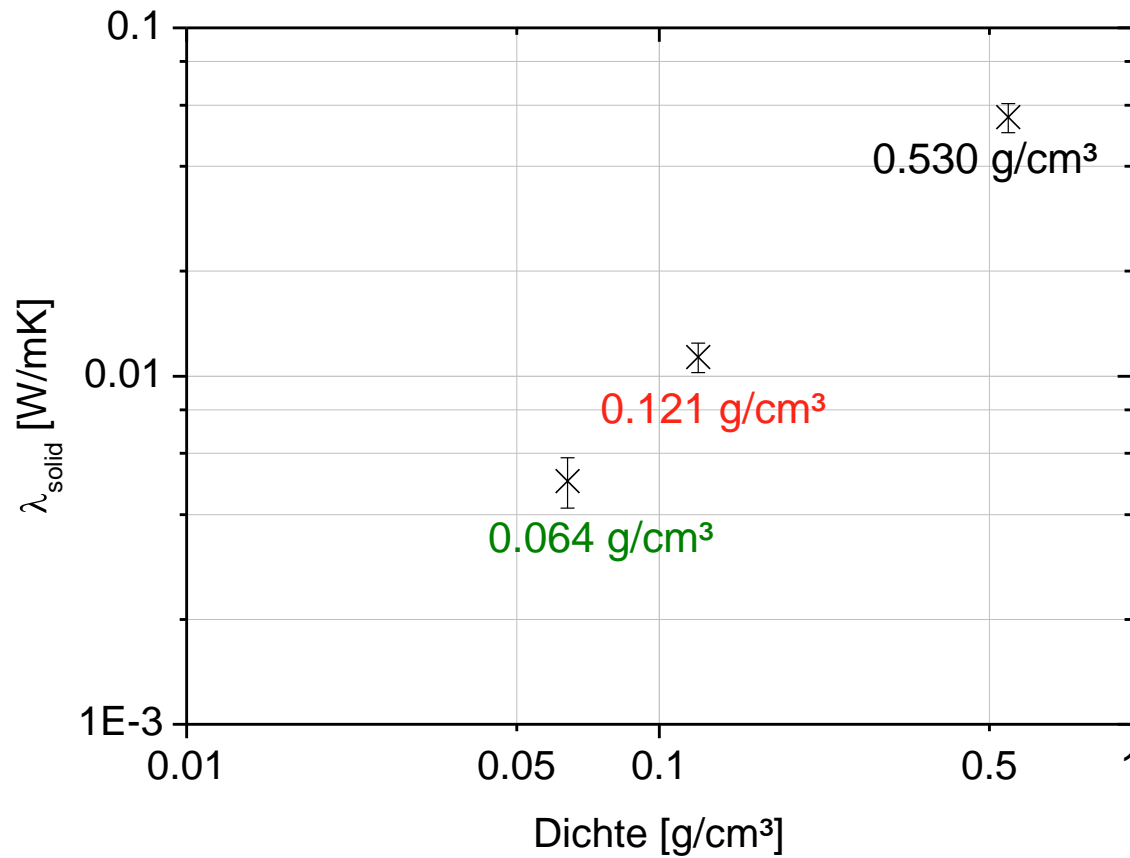
# FESTKÖRPERWÄRMELEITUNG



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

$$\lambda_{\text{total}} = \lambda_{\text{solid}} + \lambda_{\text{rad}} + \lambda_{\text{gas}}$$



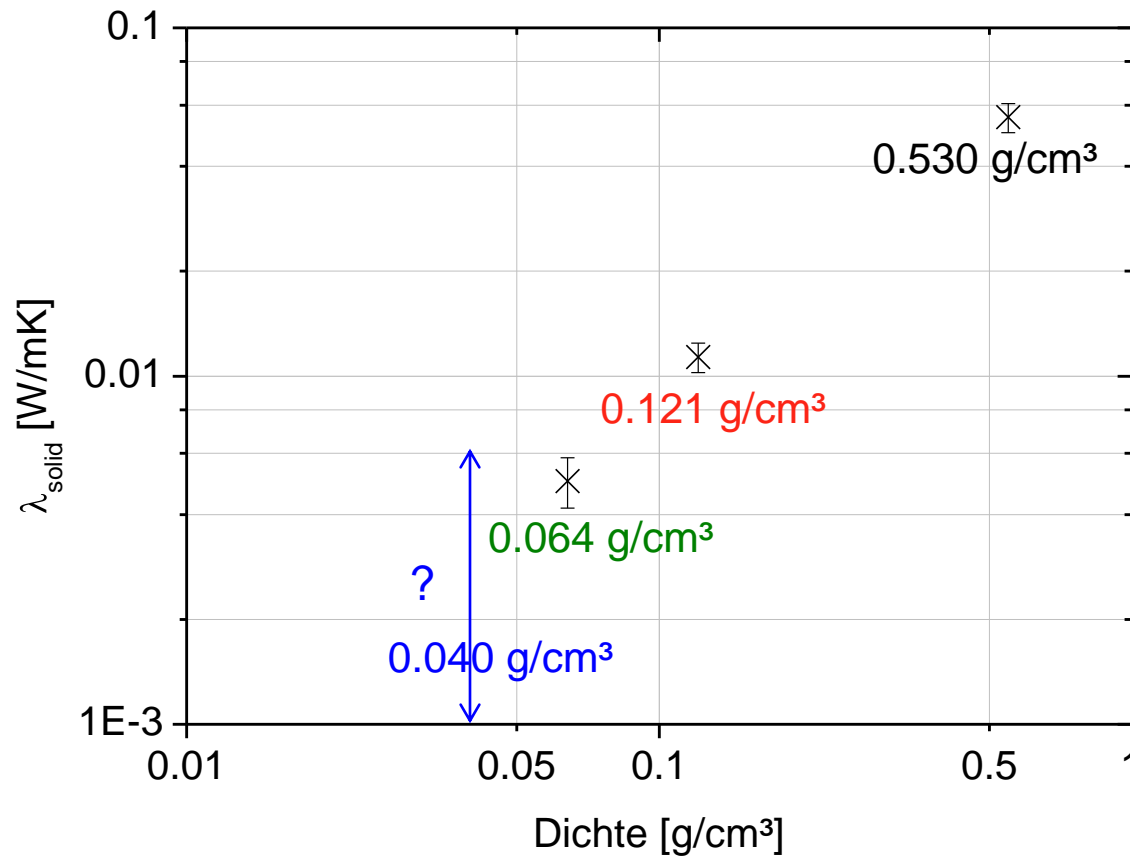
# FESTKÖRPERWÄRMELEITUNG



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

$$\lambda_{\text{total}} = \lambda_{\text{solid}} + \lambda_{\text{rad}} + \lambda_{\text{gas}}$$

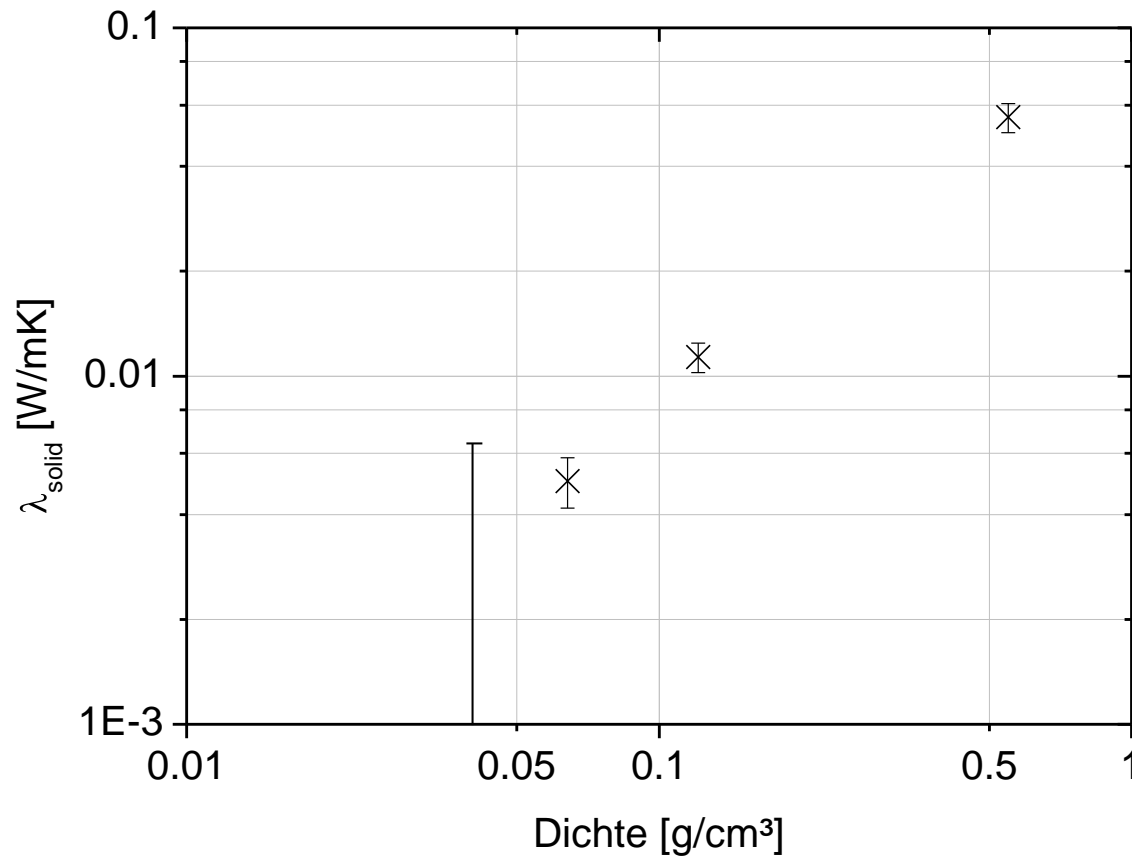


# FESTKÖRPERWÄRMELEITUNG



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

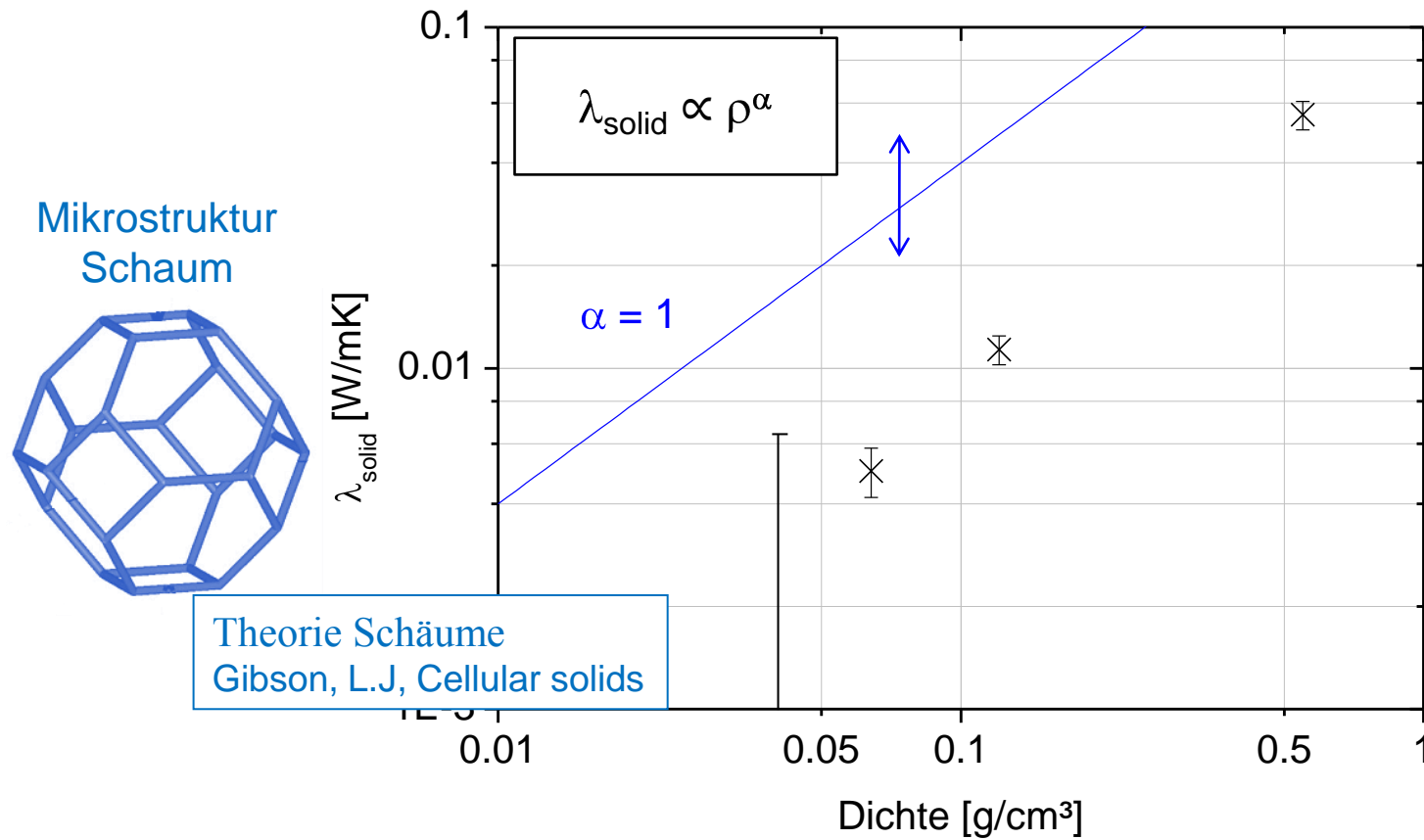


# FESTKÖRPERWÄRMELEITUNG



ZAE BAYERN

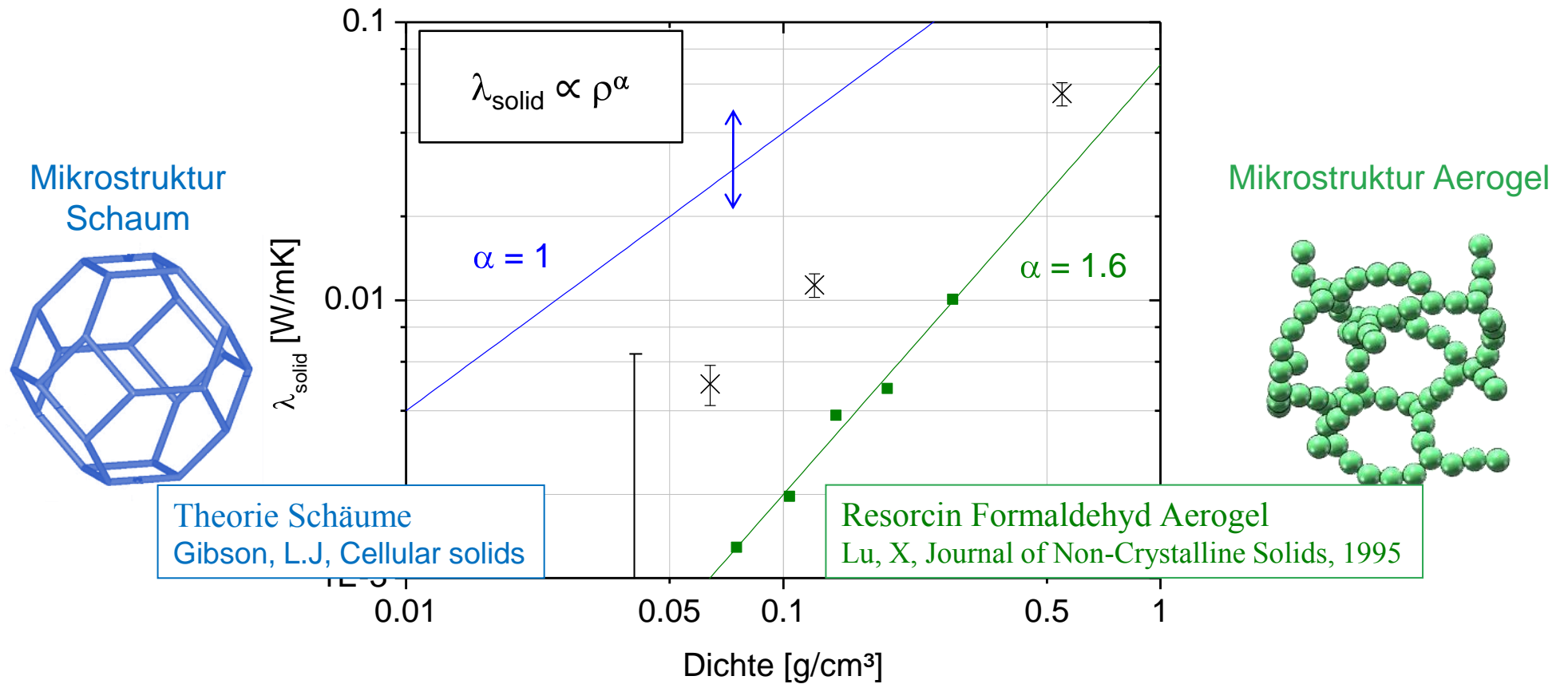
Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung



# FESTKÖRPERWÄRMELEITUNG



ZAE BAYERN  
Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

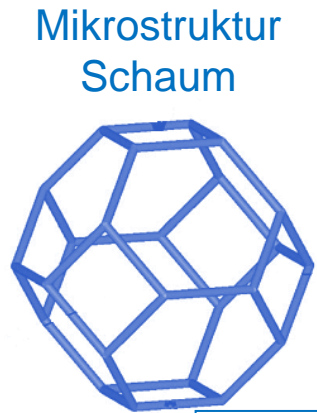
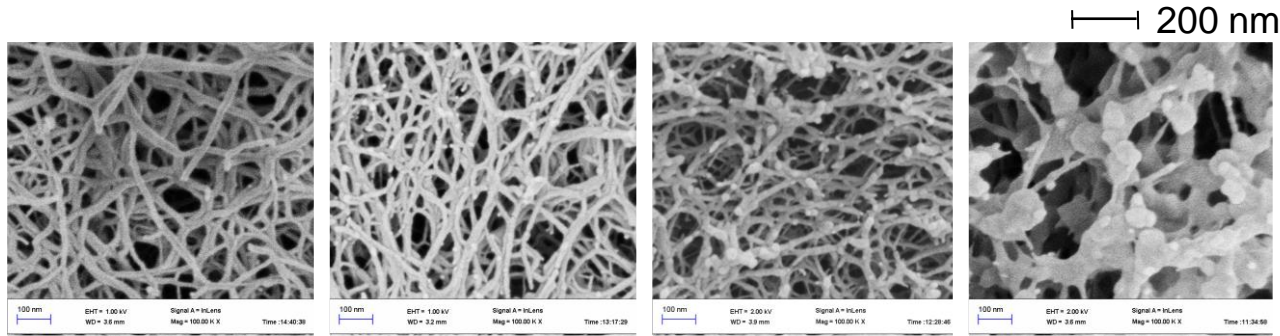




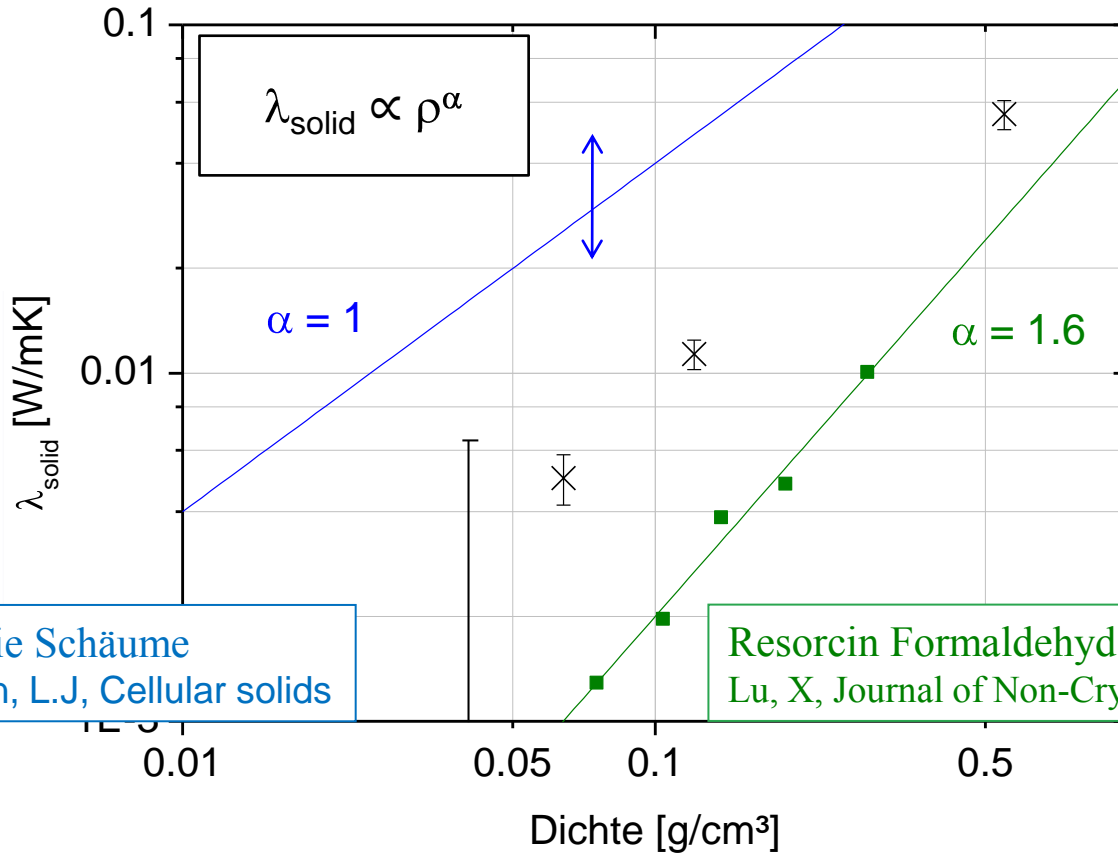
# FESTKÖRPERWÄRMELEITUNG



**ZAE BAYERN**  
Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung



Theorie Schäume  
Gibson, L.J, Cellular solids



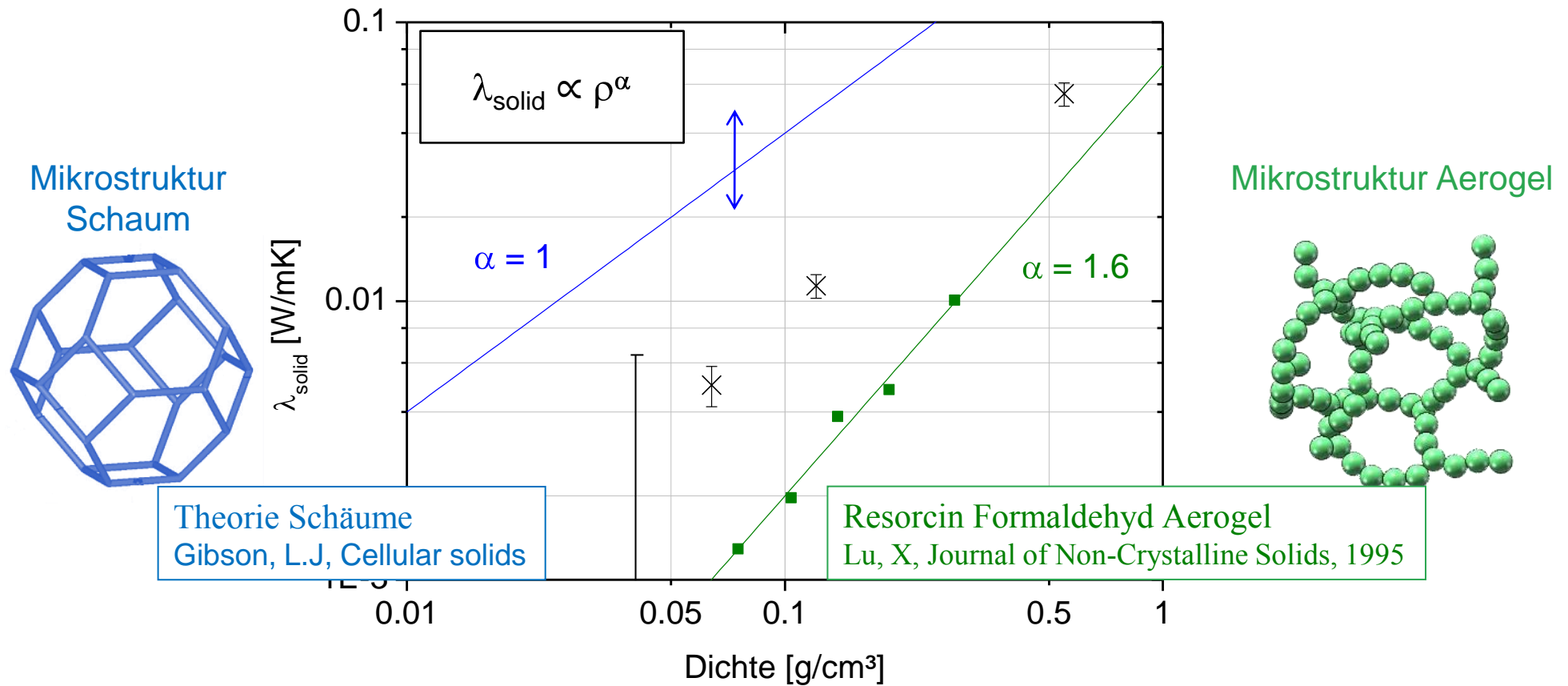
Resorcin Formaldehyd Aerogel  
Lu, X, Journal of Non-Crystalline Solids, 1995

# FESTKÖRPERWÄRMELEITUNG



ZAE BAYERN  
Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

Angabe von Festkörpermateriale und Dichte  $\rho$   
→ unzureichend zur Bestimmung von  $\lambda_{\text{solid}}$



# KORRELATION



**ZAE BAYERN**

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

# KORRELATION: $\lambda_{\text{solid}}$ UND STEIFIGKEIT



**ZAE BAYERN**

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

# KORRELATION: $\lambda_{\text{solid}}$ UND STEIFIGKEIT



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

Annahme:  $\lambda_{\text{solid}}$  und Steifigkeit hängen gleichermaßen von der Mikrostruktur poröser Materialien ab

# KORRELATION: $\lambda_{\text{solid}}$ UND STEIFIGKEIT



**ZAE BAYERN**  
Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

Annahme:  $\lambda_{\text{solid}}$  und Steifigkeit hängen gleichermaßen von der Mikrostruktur poröser Materialien ab

## Steifigkeit

E-Modul

→ Zugversuch

$c_{11}$

→ Ultraschallmethode

$$c_{11} = \rho v_1^2$$

$\rho$ : Dichte [g/cm<sup>3</sup>]

$v_1$ : Schallgeschwindigkeit [m/s]

# KORRELATION: $\lambda_{\text{solid}}$ UND STEIFIGKEIT



**ZAE BAYERN**  
Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

Annahme:  $\lambda_{\text{solid}}$  und Steifigkeit hängen gleichermaßen von der Mikrostruktur poröser Materialien ab

## Steifigkeit

E-Modul

→ Zugversuch

$C_{11}$

→ Ultraschallmethode

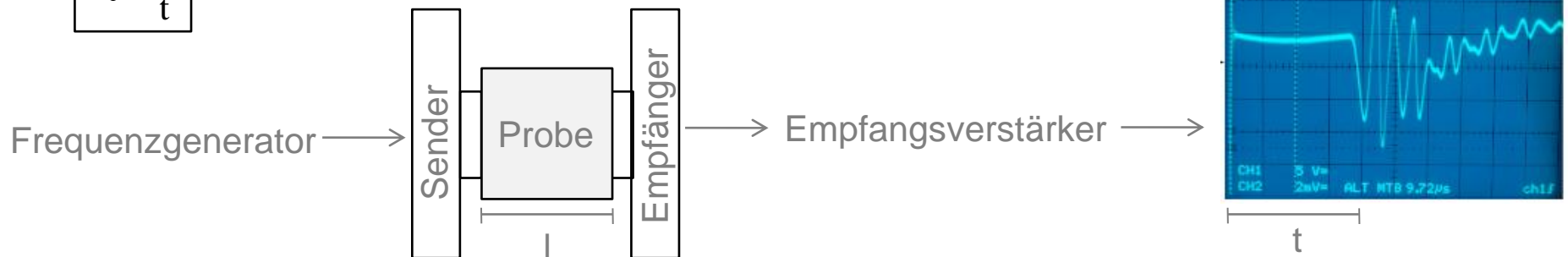
$$c_{11} = \rho v_1^2$$

$\rho$ : Dichte [g/cm<sup>3</sup>]

$v_1$ : Schallgeschwindigkeit [m/s]

## Ultraschallmethode

$$v_1 = \frac{l}{t}$$



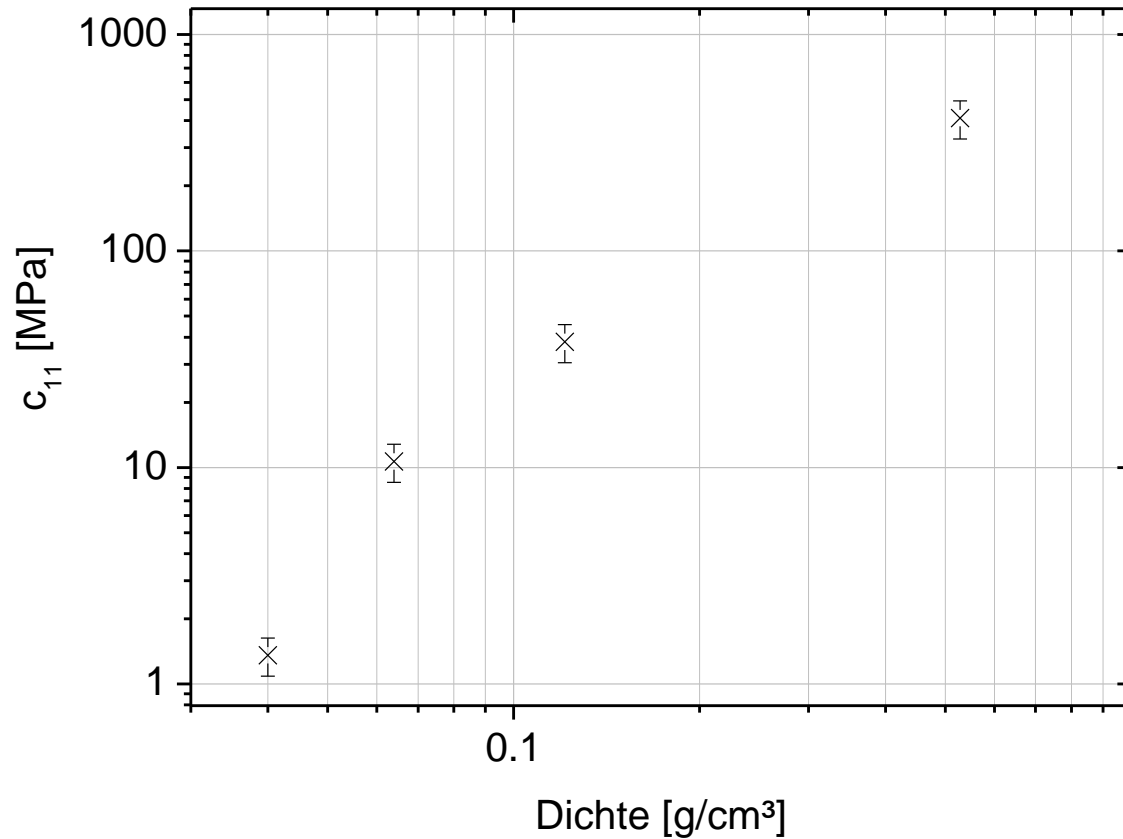
# STEIFIGKEIT: $c_{11}$



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

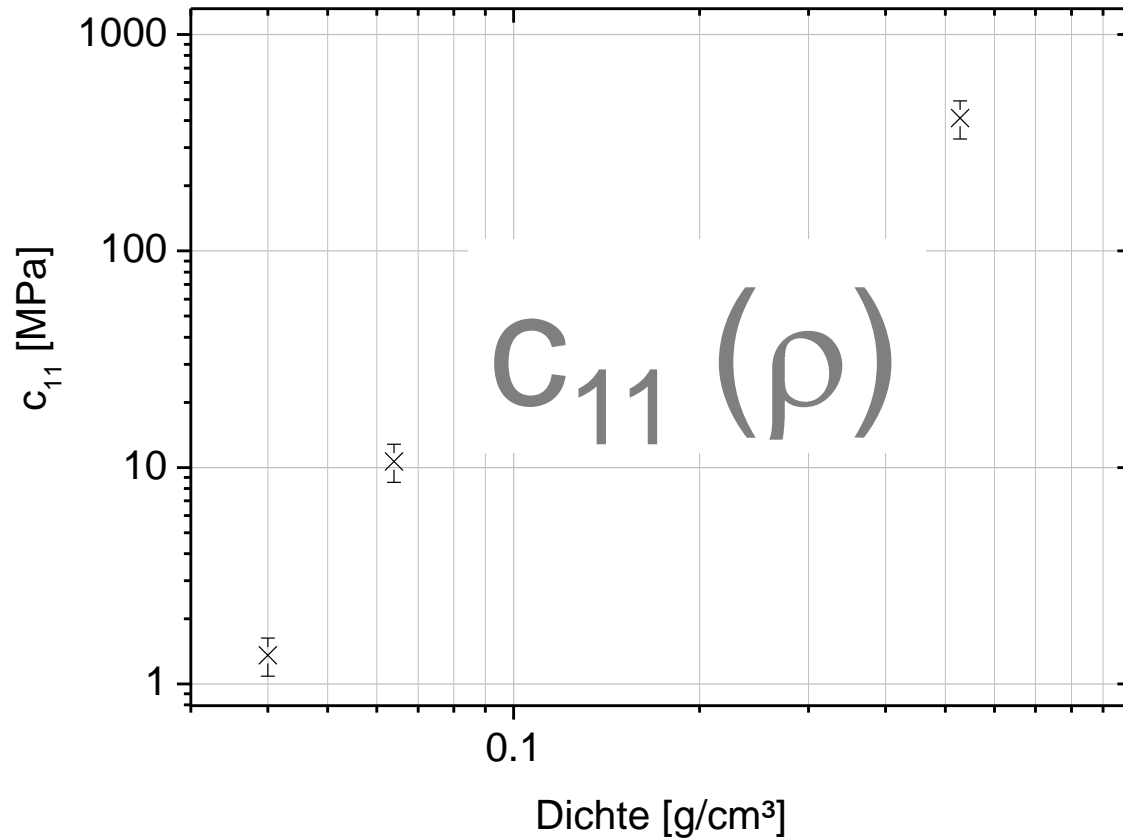
$c_{11}$  Messwerte PUA Aerogele





# STEIFIGKEIT: $c_{11}$

$c_{11}$  Messwerte PUA Aerogele

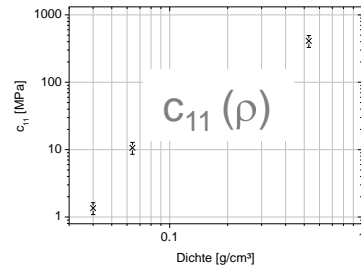


# KORRELATION: $c_{11}$ UND $\lambda_{\text{solid}}$



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

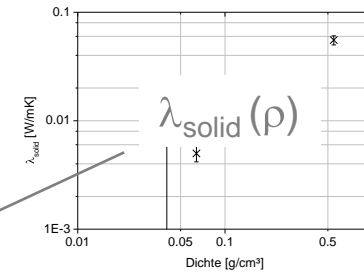
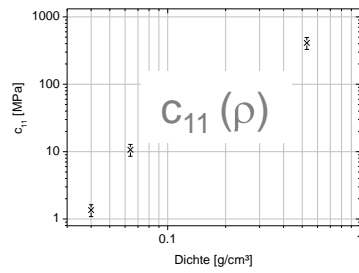


# KORRELATION: $c_{11}$ UND $\lambda_{\text{solid}}$



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung



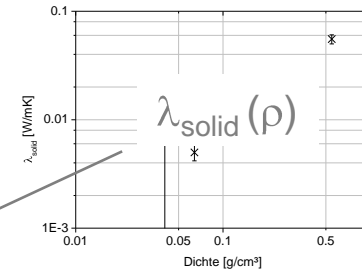
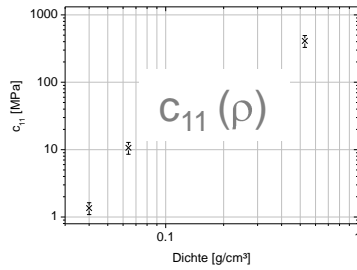
$c_{11}(\lambda_{\text{solid}})$

# KORRELATION: $c_{11}$ UND $\lambda_{\text{solid}}$

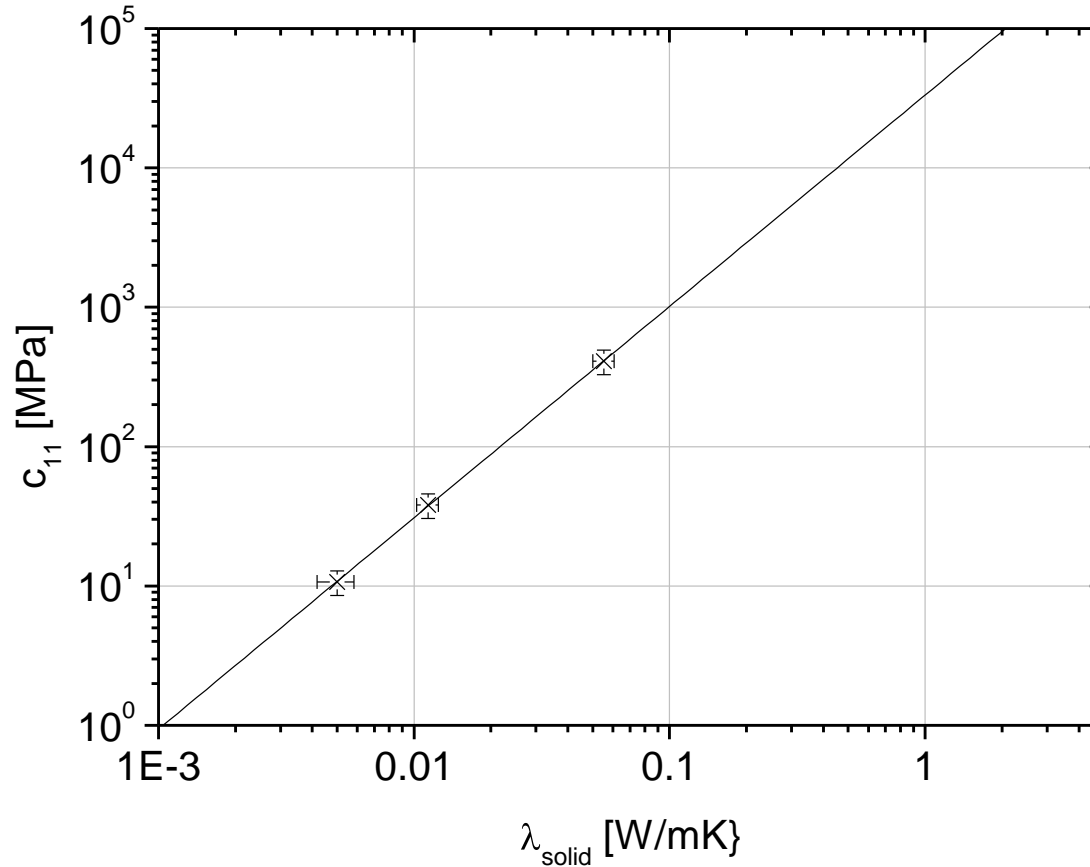


ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung



$c_{11}(\lambda_{\text{solid}})$

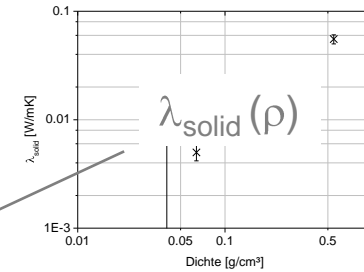
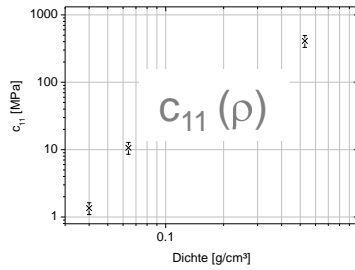


# KORRELATION: $c_{11}$ UND $\lambda_{\text{solid}}$

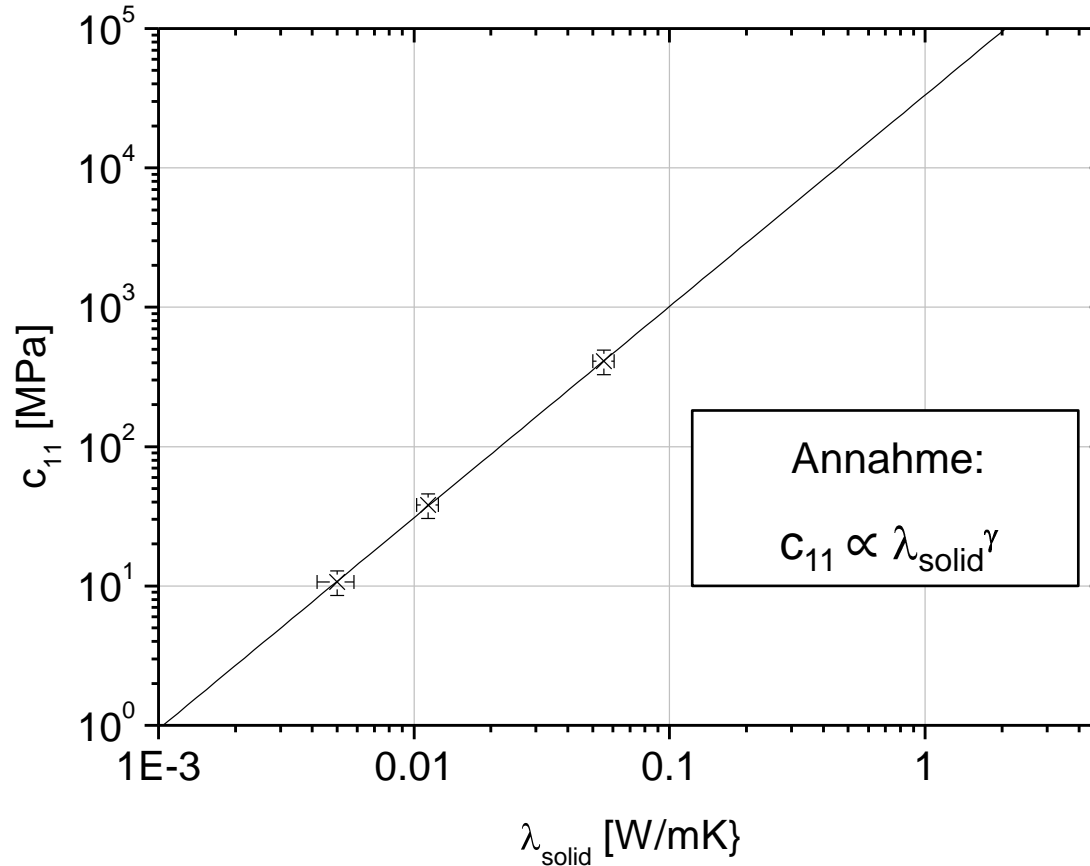


ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung



$c_{11}(\lambda_{\text{solid}})$

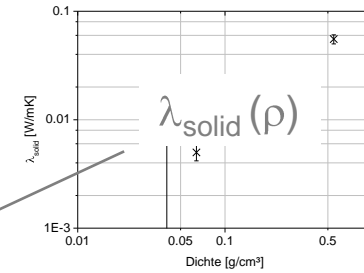
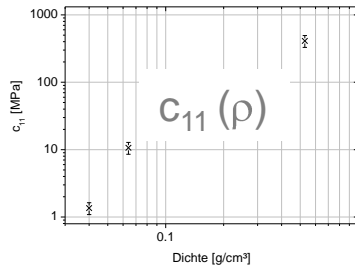


# KORRELATION: $c_{11}$ UND $\lambda_{\text{solid}}$

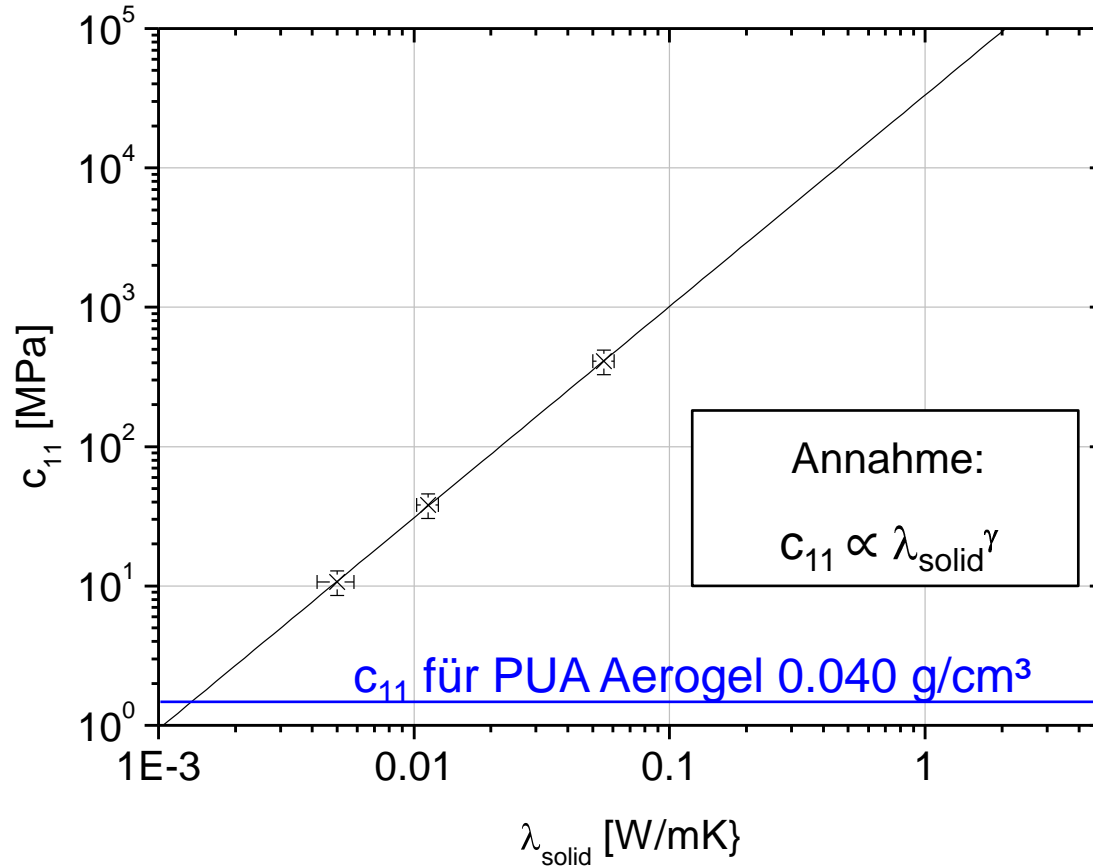


ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung



$c_{11}(\lambda_{\text{solid}})$

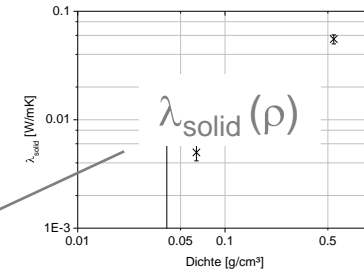
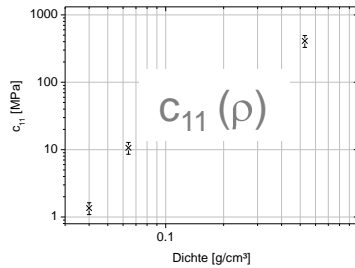


# KORRELATION: $c_{11}$ UND $\lambda_{\text{solid}}$

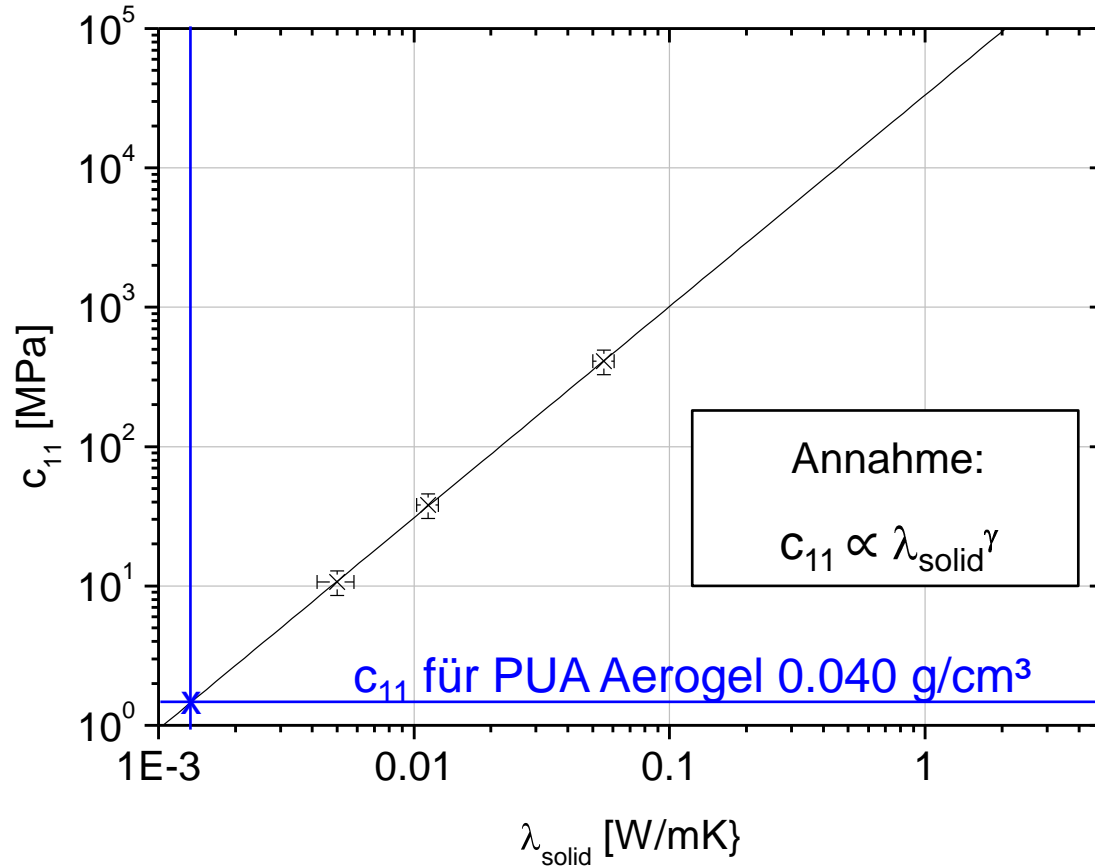


ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung



$c_{11}(\lambda_{\text{solid}})$

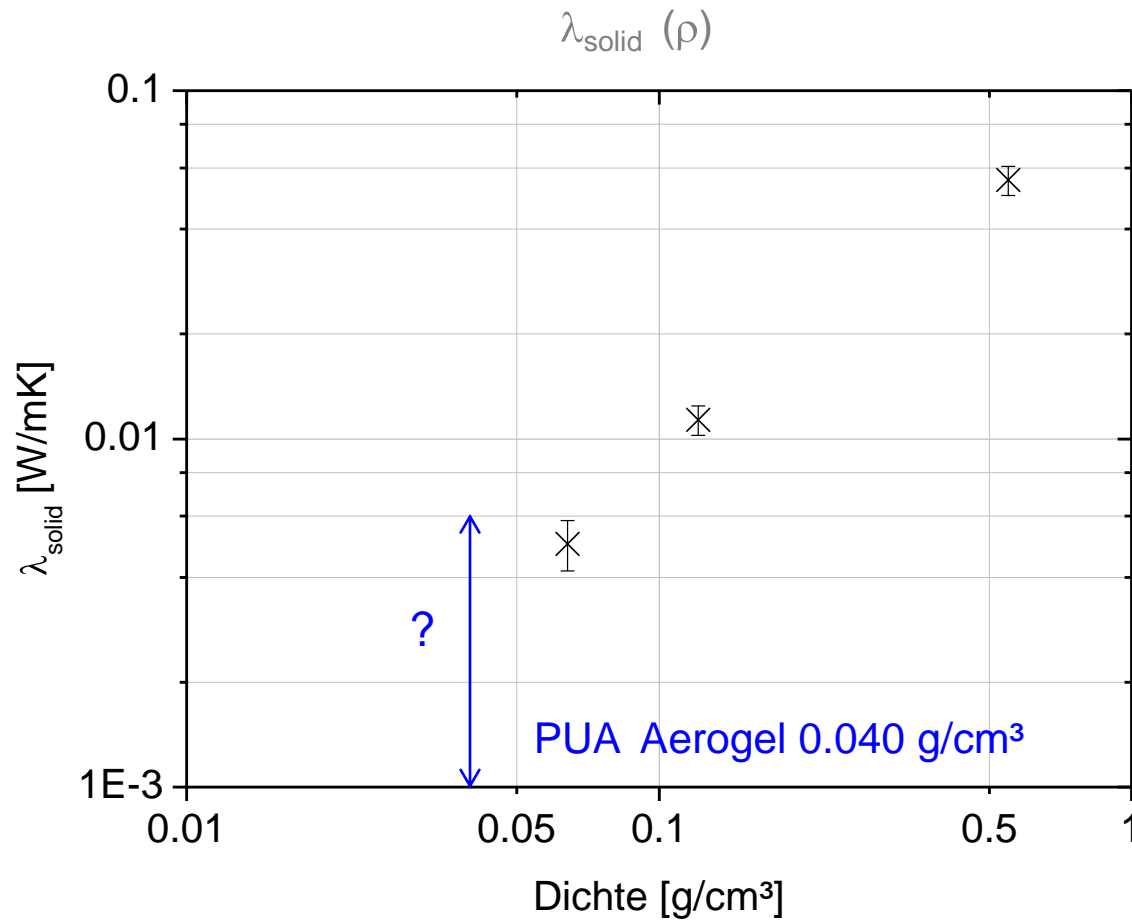


# FESTKÖRPERWÄRMELEITUNG



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung



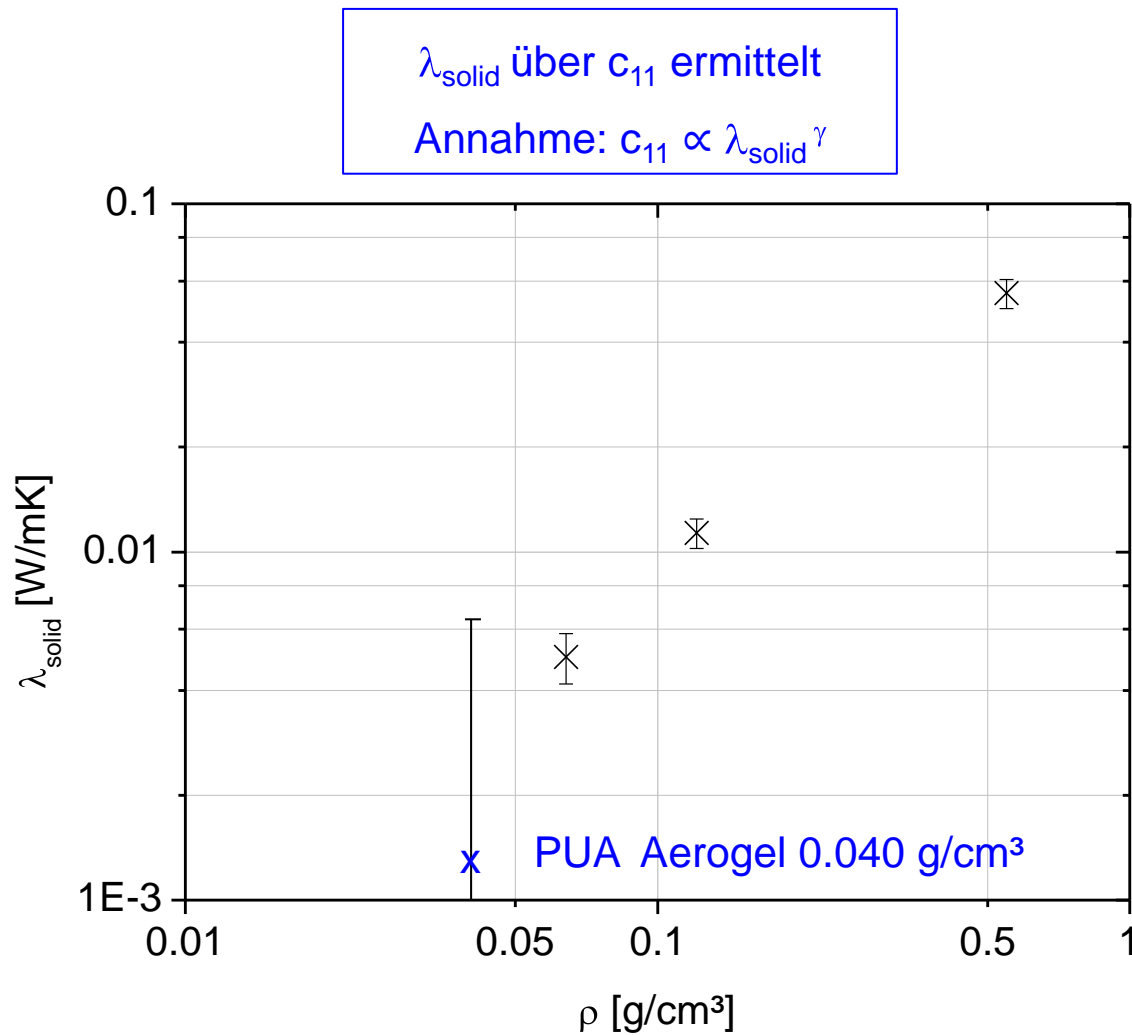


# FESTKÖRPERWÄRMELEITUNG



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung



# ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK



**ZAE BAYERN**

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

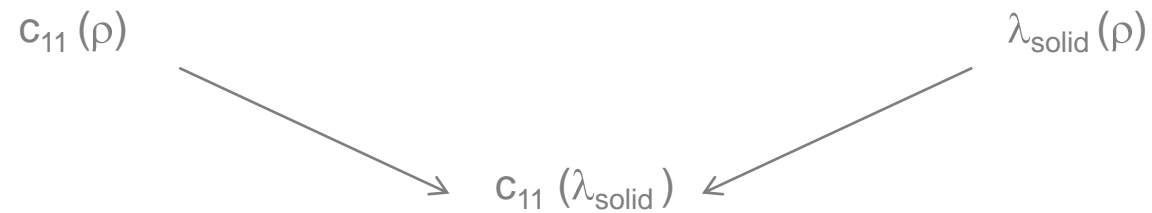
# ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

Korrelation  $\lambda_{\text{solid}}$  und Steifigkeit hängen gleichermaßen von der Mikrostruktur poröser Materialien ab



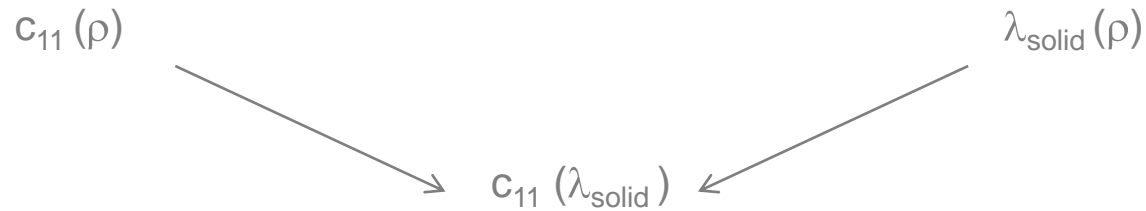
# ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK



ZAE BAYERN

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung

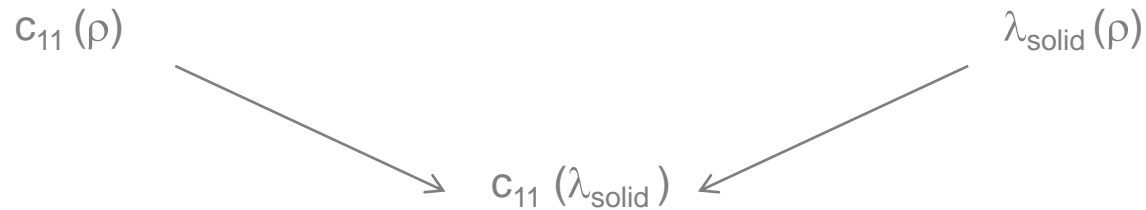
Korrelation  $\lambda_{\text{solid}}$  und Steifigkeit hängen gleichermaßen von der Mikrostruktur poröser Materialien ab



PUA Aerogele Bestimmung von  $\lambda_{\text{solid}}$  durch Messung von  $c_{11}$

# ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Korrelation  $\lambda_{\text{solid}}$  und Steifigkeit hängen gleichermaßen von der Mikrostruktur poröser Materialien ab



PUA Aerogele Bestimmung von  $\lambda_{\text{solid}}$  durch Messung von  $c_{11}$

## Ausblick

Physikalischer Zusammenhang zwischen  $\lambda_{\text{solid}}$  und Steifigkeit

Mathematische Formulierung der Korrelation

# VIELEN DANK

Kontakt: [weigold@zae.uni-wuerzburg.de](mailto:weigold@zae.uni-wuerzburg.de)

MIT SONNE UND VERSTAND.

© ZAE Bayern • AK Thermophysik • Lena Weigold • 3./4. Mai 2012



**ZAE BAYERN**

Bayerisches Zentrum  
für Angewandte  
Energieforschung