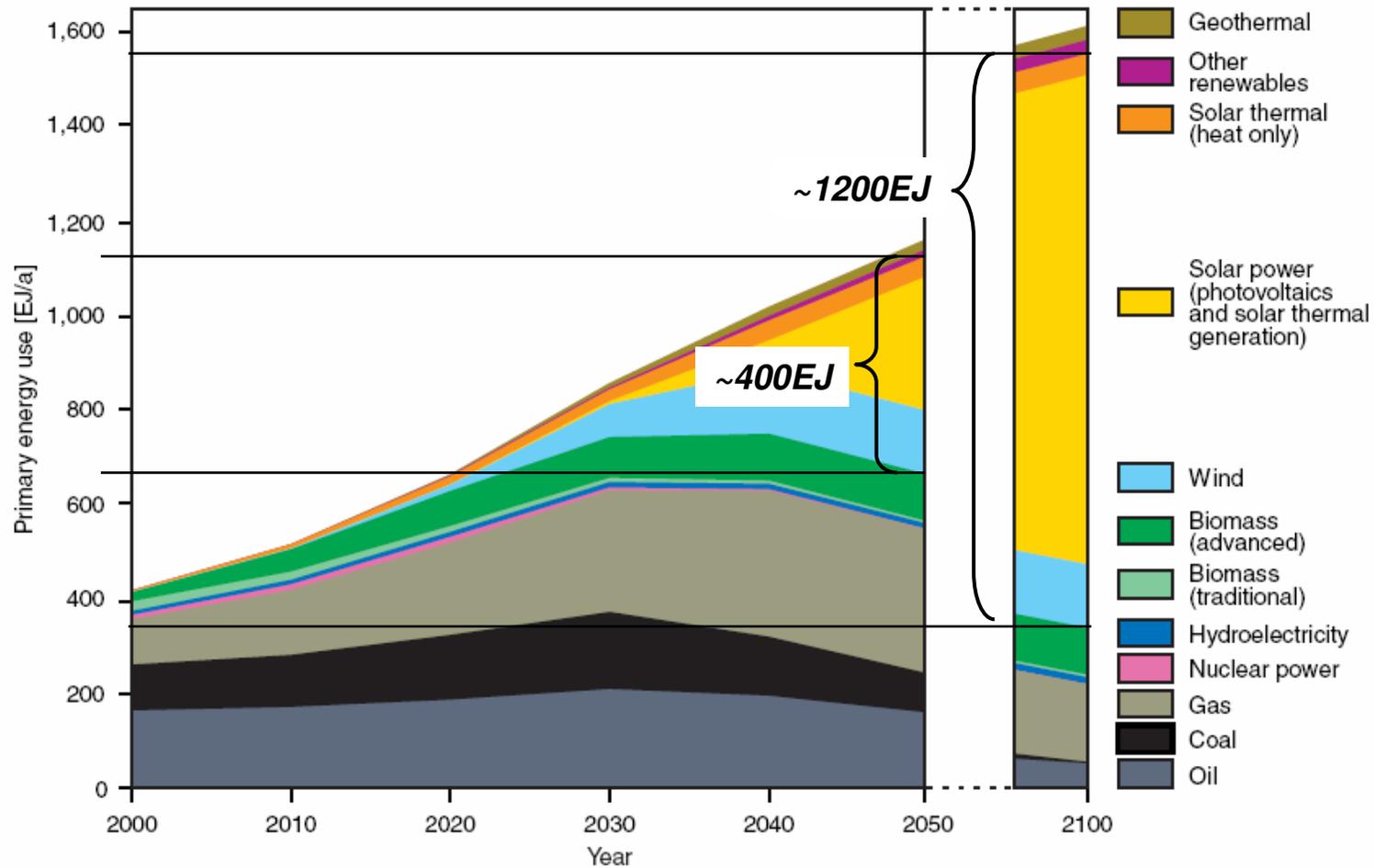


# ***Trilobale Polyimid-Fasern als Dämmung für kryogene Anwendungen***

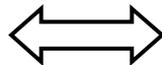
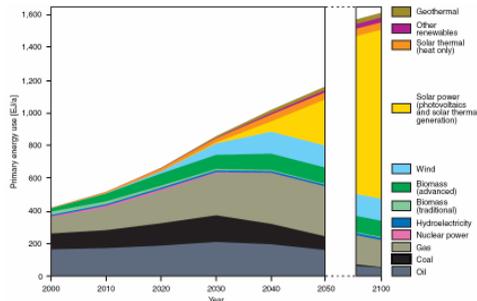
***M. Geisler, J. Wachtel, F. Hemberger,  
S. Vidi, H.-P. Ebert***

**ZAE Bayern  
Das Bayerische Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V.  
Abteilung 2: Funktionsmaterialien der Energietechnik**

# Motivation



Quelle: WBGU, Towards sustainable energy systems, <http://www.wbgu.de>, 2003



***integrated cable energy system for fuel and power***  
Projektlaufzeit: 01.07.2006 bis 30.06.2009

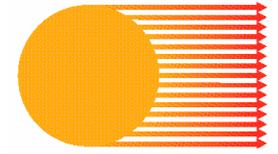
## Projektziele:

- Energiespeicherung
- Energietransport
- Energiewandlung
- Pufferung fluktuierender Spitzenlasten

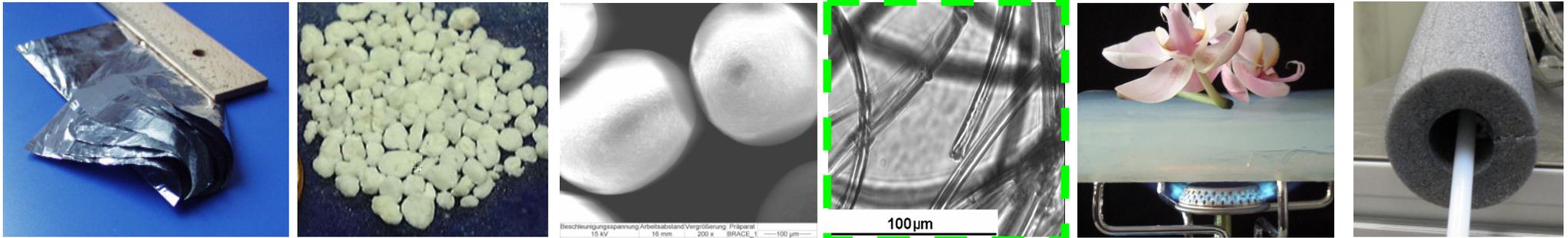
## ZAE-Aufgaben:

- neuartiges thermisch superisoliertes Kabel
  - hybrider Transport von kryogenen Brennstoffen (LH<sub>2</sub>, LNG), elektrischem Strom und Daten
  - hohe Energiedichten
  - sehr geringe Querschnitte und Durchflüsse

# Motivation - Vergleich evakuierter Dämmmaterialien



ZAE BAYERN

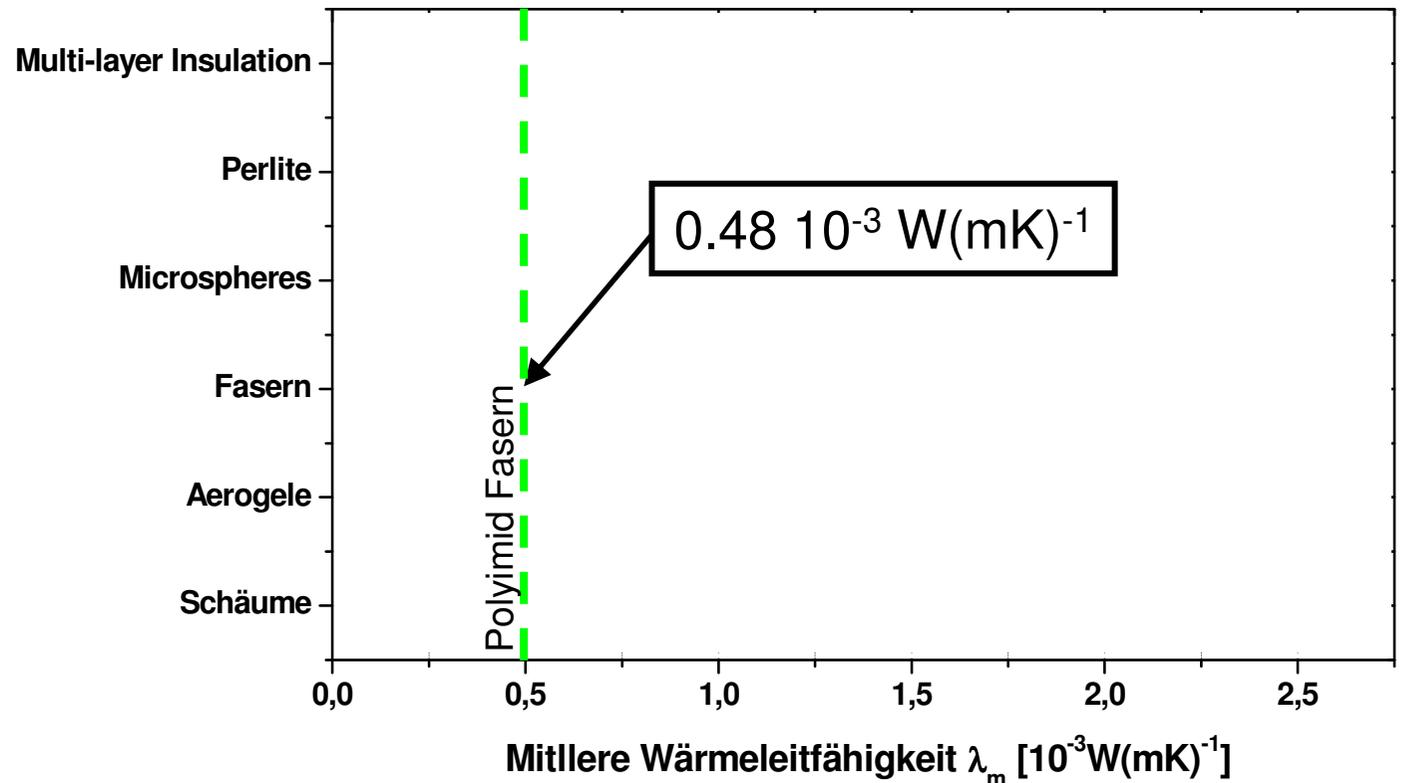


$$\lambda_m = \frac{1}{T_{hot} - T_{cold}} \int_{T_{cold}}^{T_{hot}} \lambda(T) \cdot dT$$

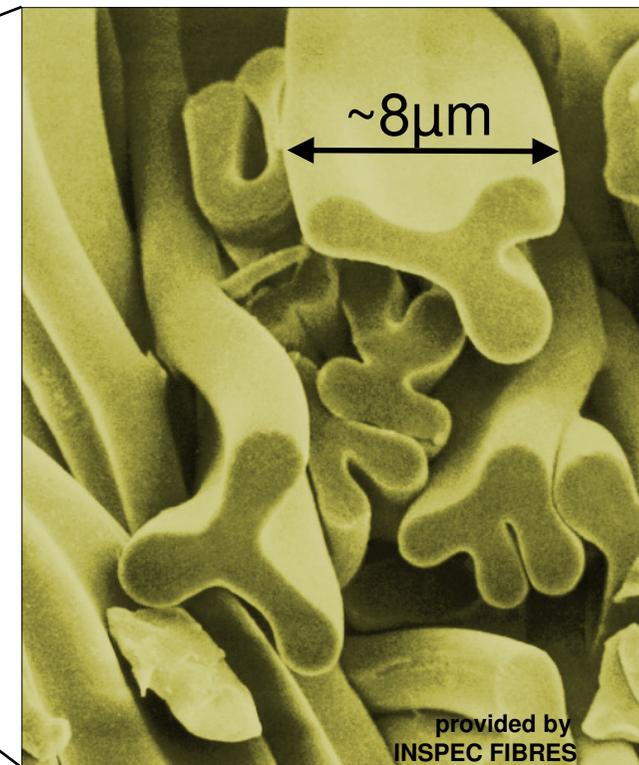
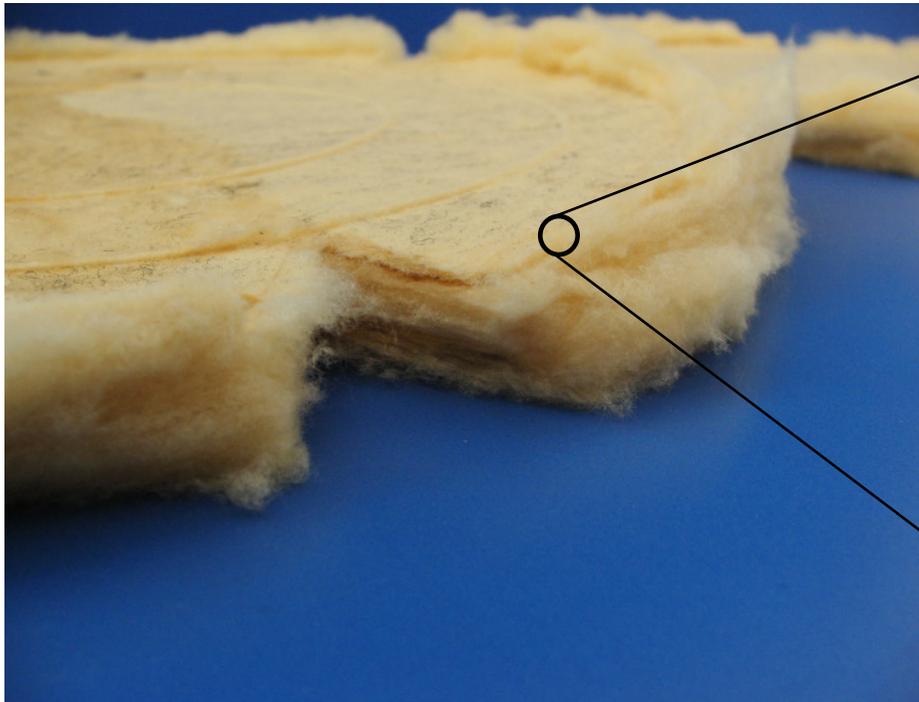
Randbedingungen:

$$T_{cold} = 77K$$

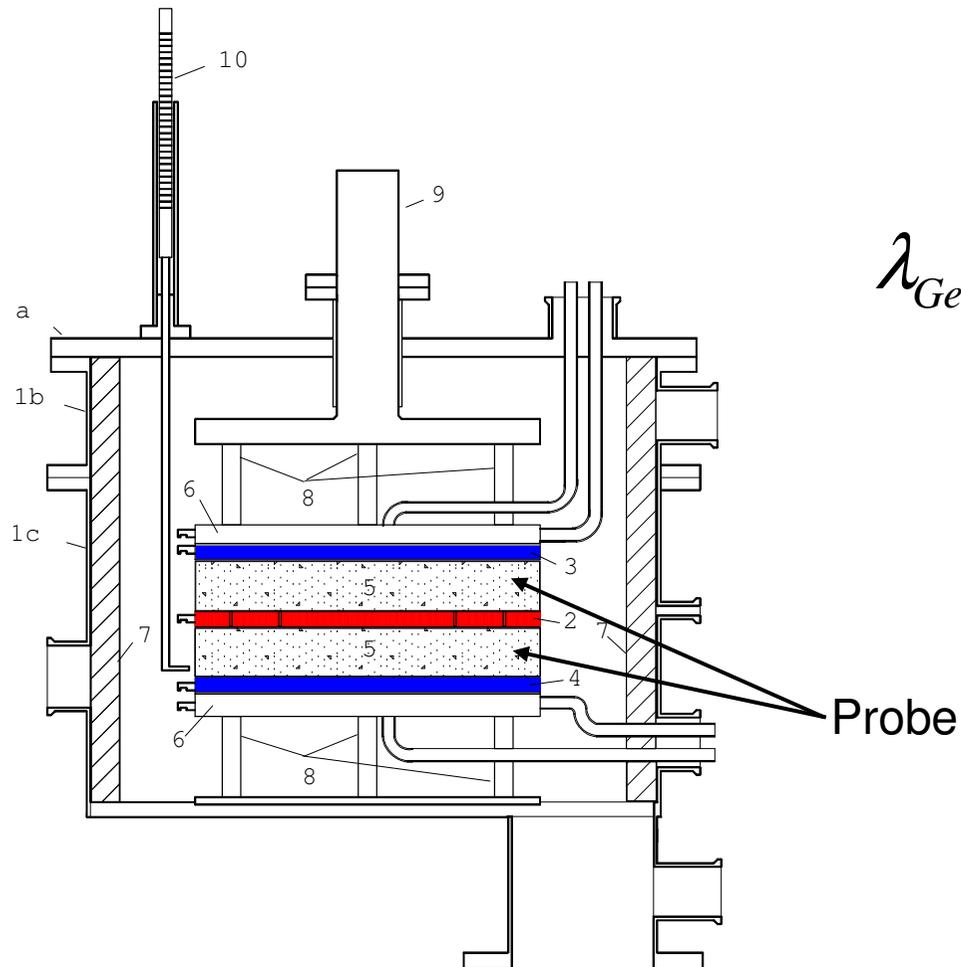
$$T_{hot} = 300K$$



## Foto der Polyimid-Fasern

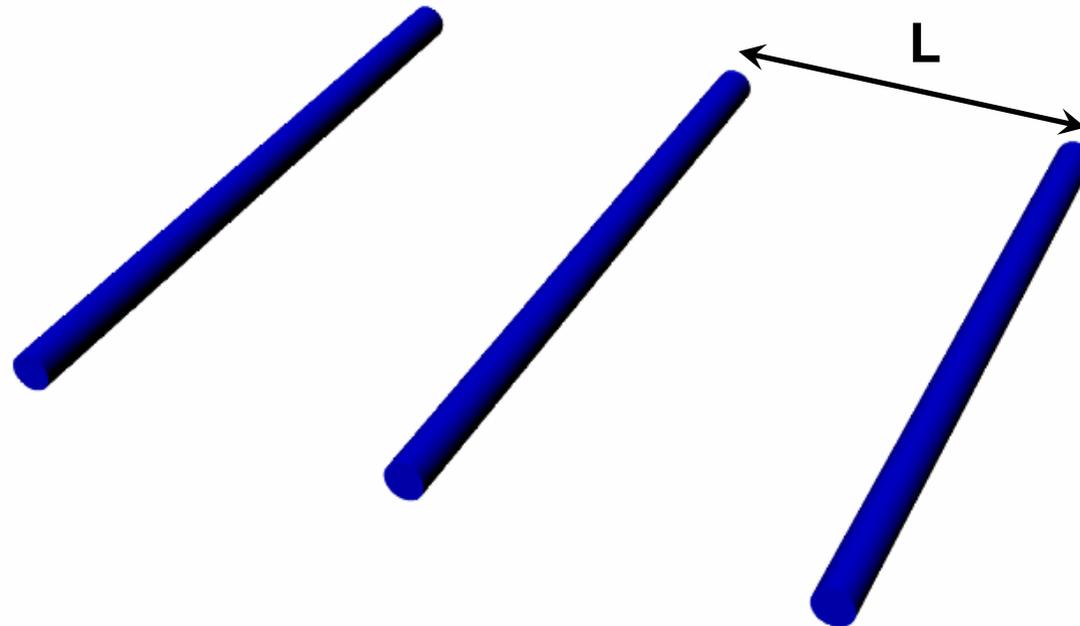


trilobal = „Propeller“-geformt

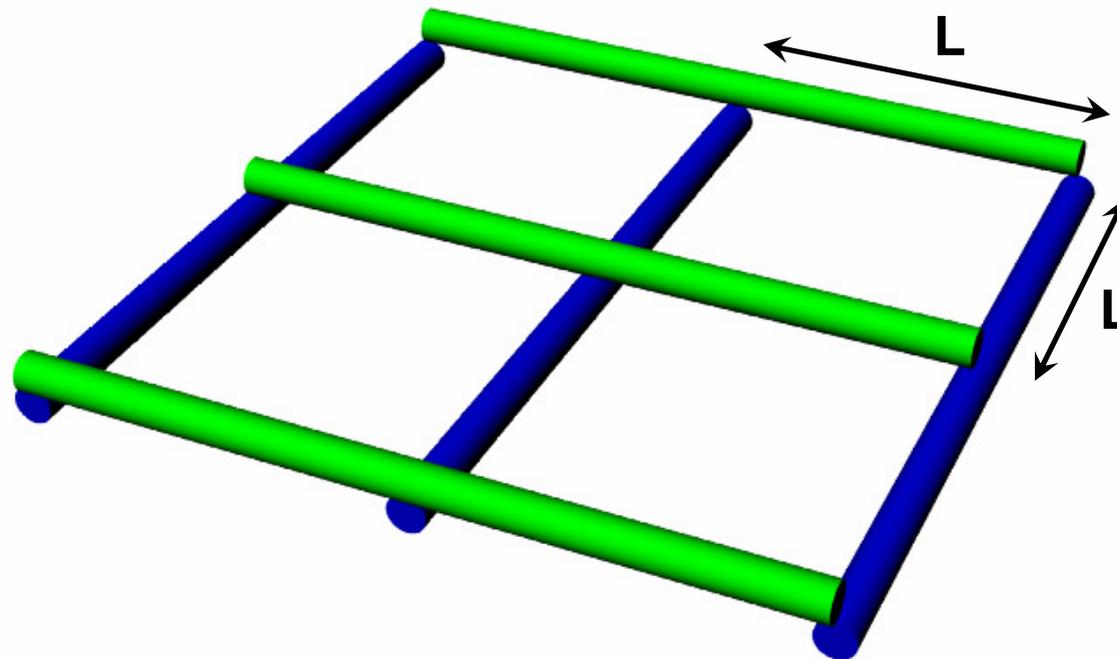


$$\lambda_{\text{Gesamt}}(T) = \lambda_{\text{solid}}(T) + \lambda_{\text{rad}}(T)$$

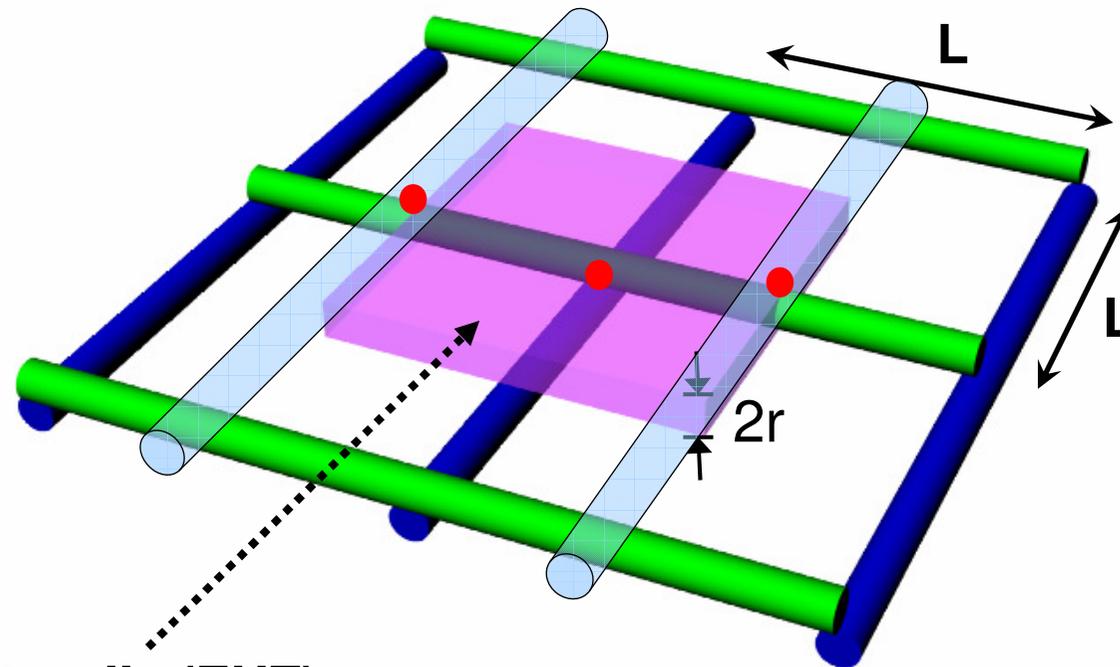
$$\lambda_{\text{rad}}(T) \sim T^3$$



\* [Kaganer] M. G. Kaganer, *Thermal insulation in cryogenic engineering* (IPST Press, Jerusalem, 1969), pp. 18-25.

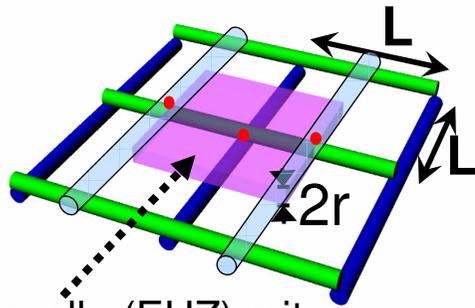


\* [Kaganer] M. G. Kaganer, *Thermal insulation in cryogenic engineering* (IPST Press, Jerusalem, 1969), pp. 18-25.



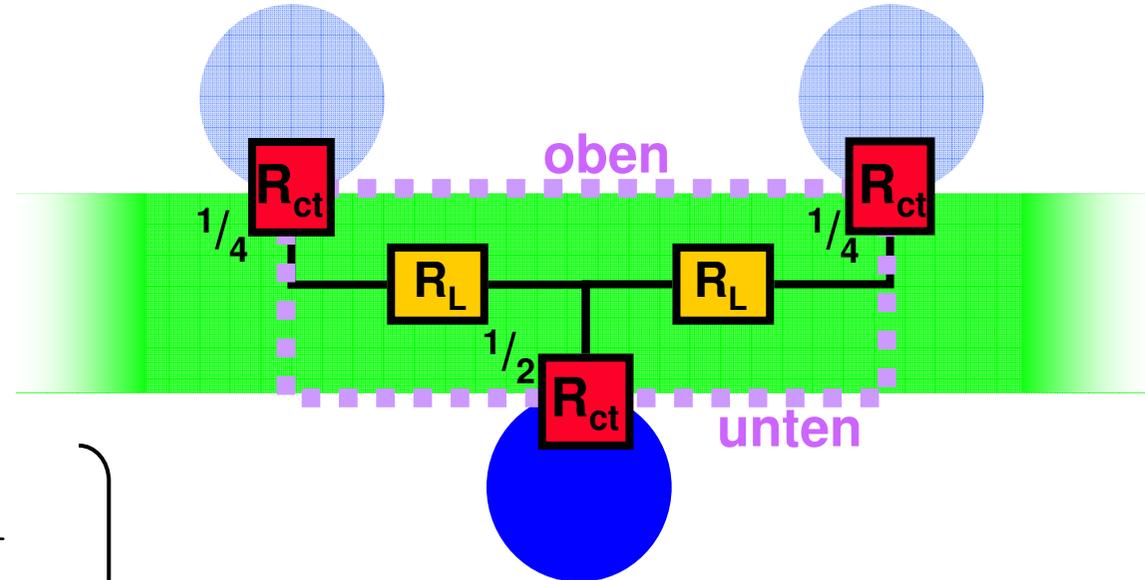
**Einheitszelle (EHZ)** mit  
Faserabstand =  $L$   
Faserdurchmesser =  $2r$

\* [Kaganer] M. G. Kaganer, *Thermal insulation in cryogenic engineering* (IPST Press, Jerusalem, 1969), pp. 18-25.



Einheitszelle (EHZ) mit  
Faserabstand = L  
Faserdurchmesser = 2r

Thermisches Widerstandsnetzwerk :



Leiter-  
widerstand  $R_L = \frac{L/2}{\pi \cdot r^2 \cdot \lambda_{bulk}}$

Kontakt-  
widerstand  $R_{ct} = \frac{1}{2 \cdot a_{ct} \cdot \lambda_{bulk}}$

$R_{EHZ} \Rightarrow \underline{\underline{\lambda_{solid, zylindrisch}}}$

Kontakt-Radius:

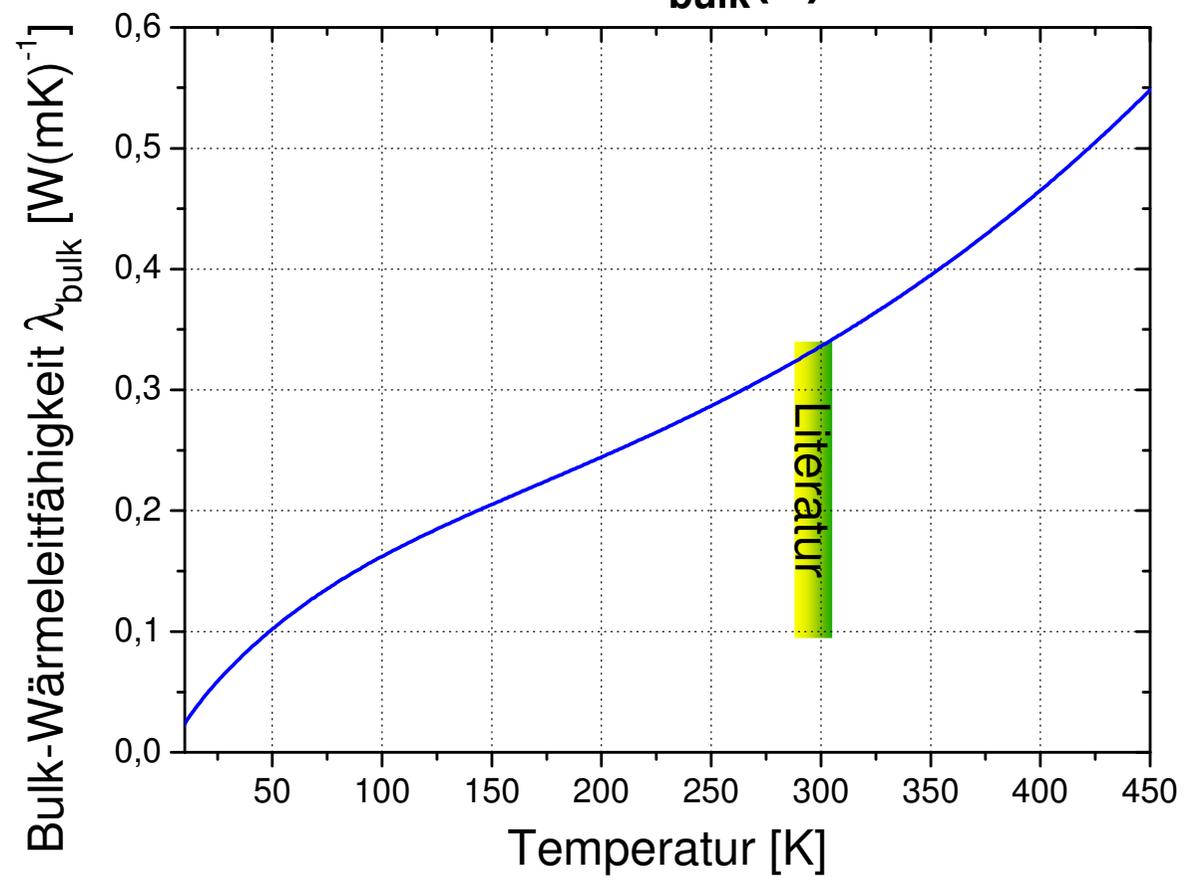
$a_{ct} \sim \sqrt[3]{F \cdot r}$

$F$  - Durchschnittliche Kraft  
auf einen Kontaktpunkt  
 $r$  - Faser-Radius

# Bulk-Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{bulk}}$ für Polyimid

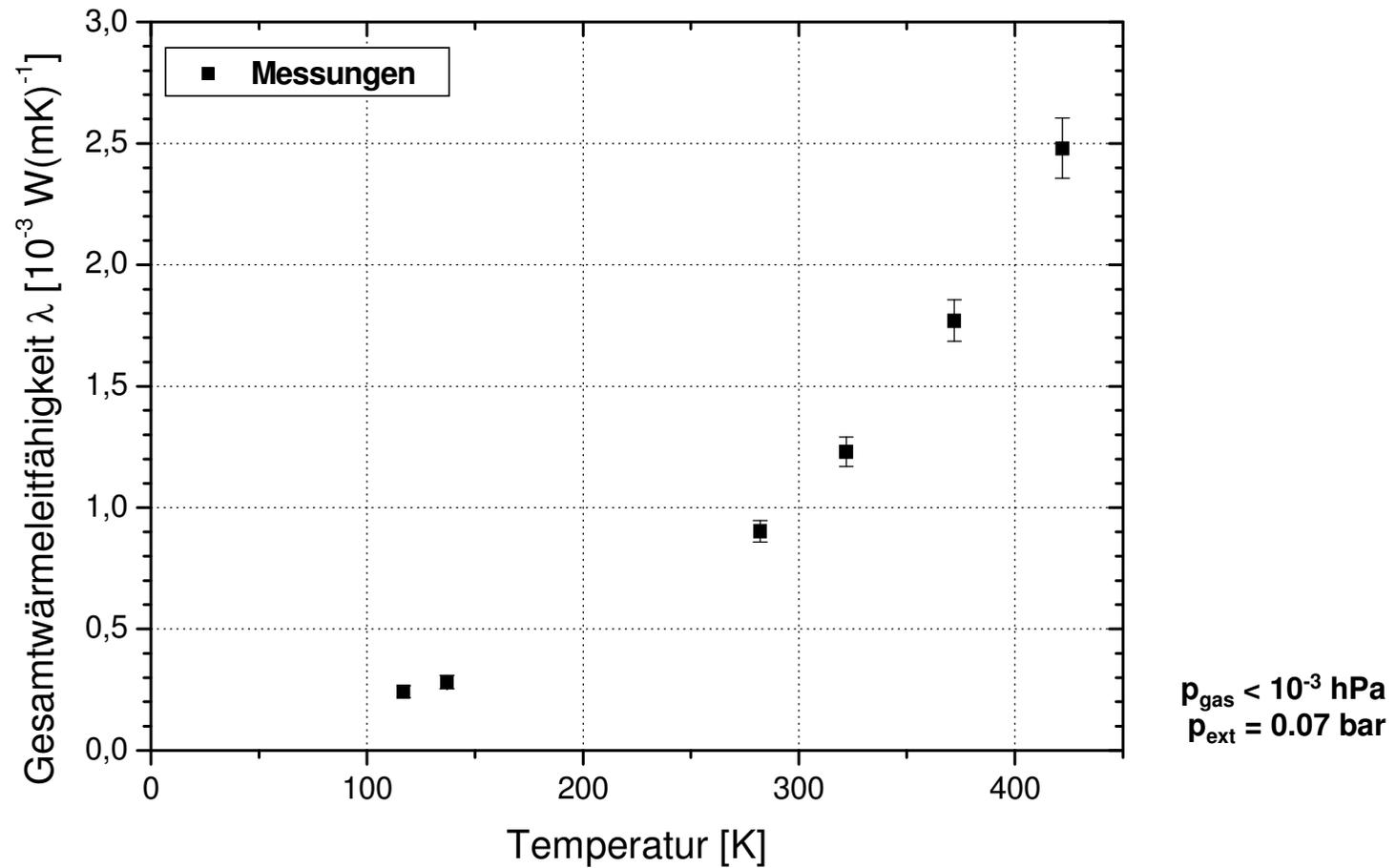
In der Literatur\*: @ 300K  $\lambda_{\text{bulk}} = 0.1 \dots 0.35 \text{ W(mK)}^{-1}$

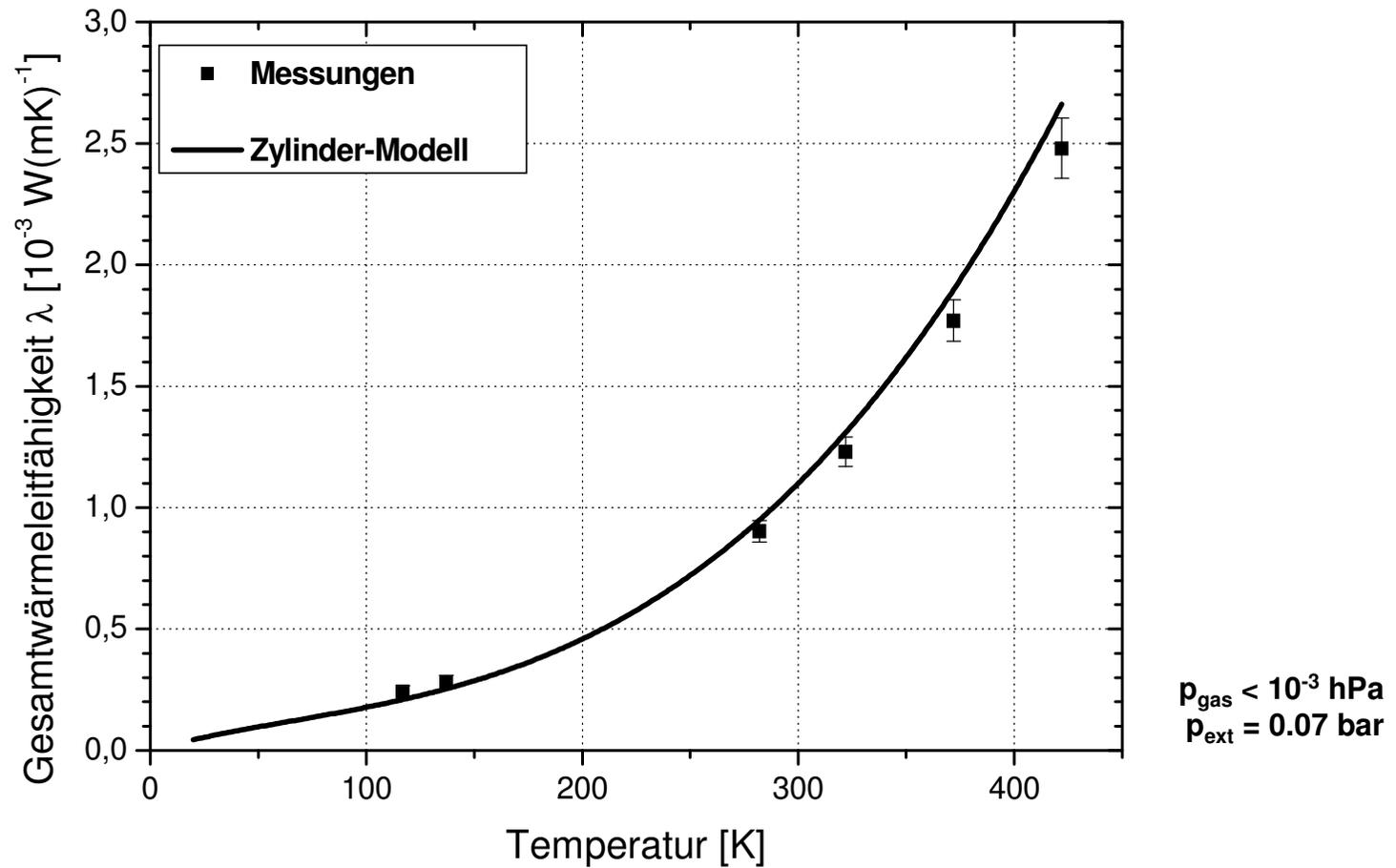
**NIST -  $\lambda_{\text{bulk}}(T)$ \*\***



⇒  $\lambda_{\text{solid, zylindrisch}}(T)$

\* *Polyimid (PI) - Physical properties*, <http://www.goodfellow.com/csp/active/static/G/Polyimid.HTML>  
 \*\* *Polyimid (PI) - Physical properties (fit-function)*, [http://cryogenics.nist.gov/MPropsMAY/Polyimide%20Kapton/PolyimideKapton\\_rev.htm](http://cryogenics.nist.gov/MPropsMAY/Polyimide%20Kapton/PolyimideKapton_rev.htm)  
 M. Geisler *Trilobale Polyimid-Fasern als Dämmung für kryogene Anwendungen*

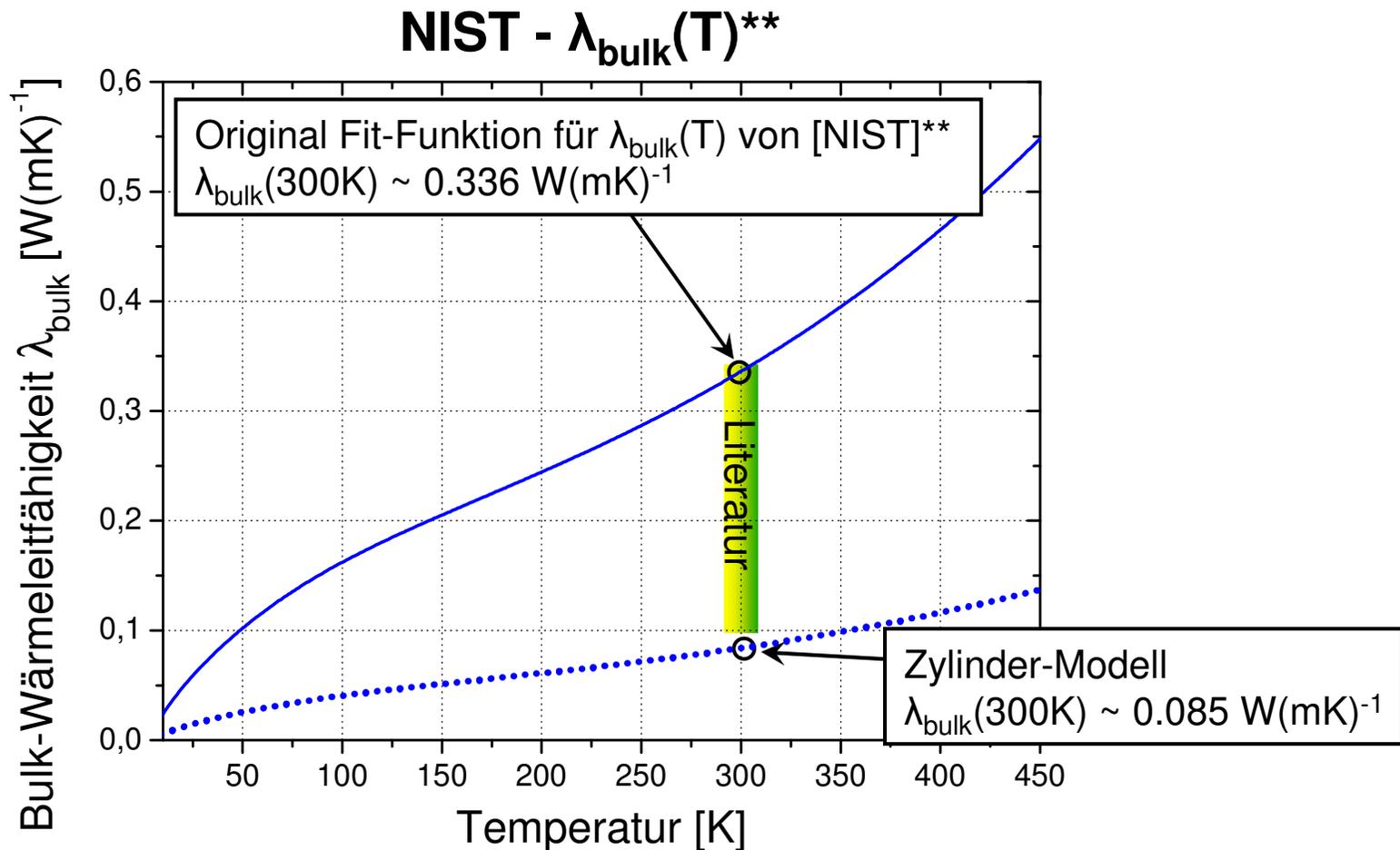




# Skalierte Bulk-Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{bulk}}$ für Polyimid

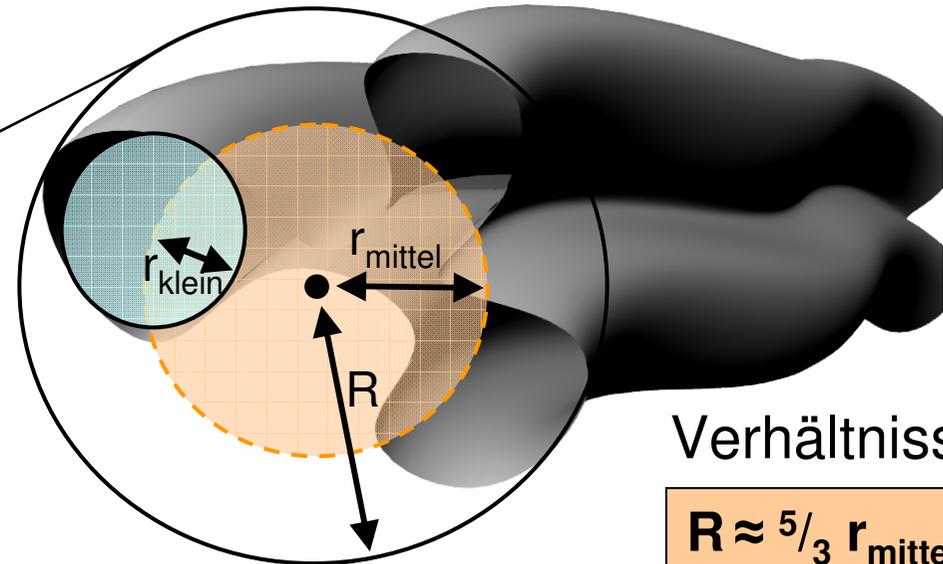
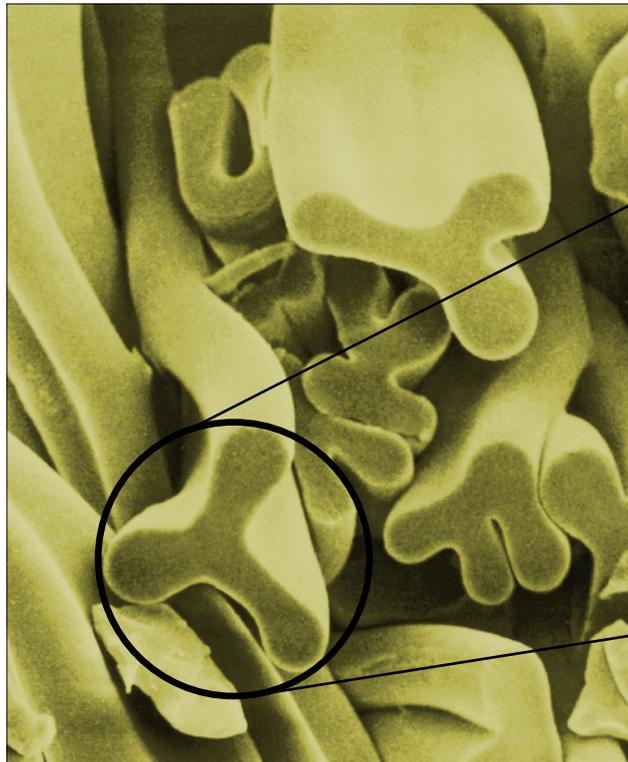


In der Literatur\*: @ 300K  $\lambda_{\text{bulk}} = 0.1 \dots 0.35 \text{ W(mK)}^{-1}$



\* Polyimid ( PI ) - Physical properties, <http://www.goodfellow.com/csp/active/static/G/Polyimid.HTML>

\*\* Polyimid ( PI ) - Physical properties (fit-function), [http://cryogenics.nist.gov/MPropsMAY/Polyimide%20Kapton/PolyimideKapton\\_rev.htm](http://cryogenics.nist.gov/MPropsMAY/Polyimide%20Kapton/PolyimideKapton_rev.htm)

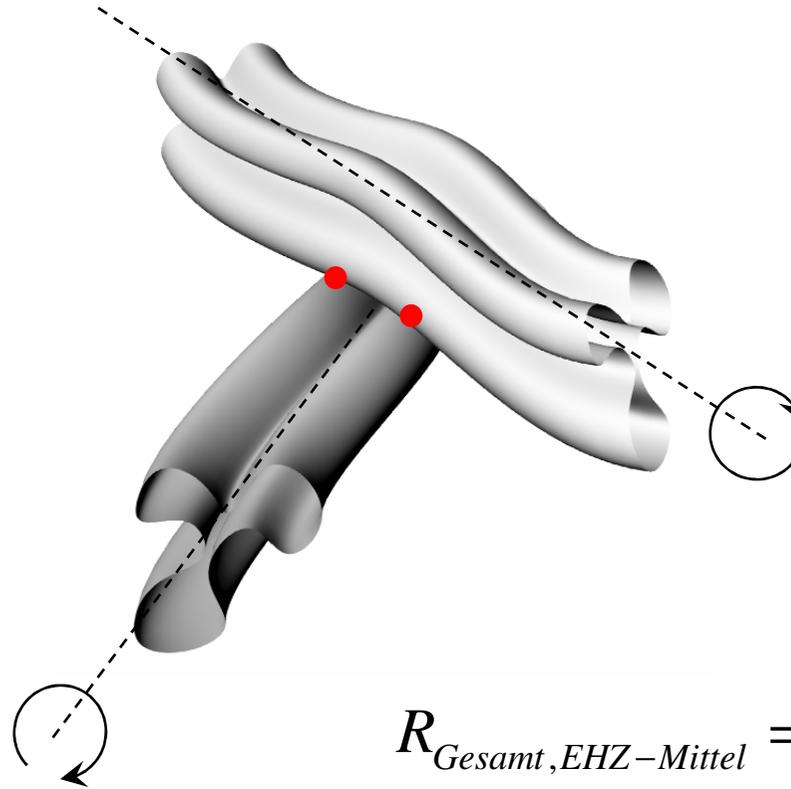


Verhältnisse:

$$R \approx \frac{5}{3} r_{\text{mittel}}$$

$$R \approx 5 r_{\text{klein}}$$

- $R$  → Höhe der neuen EHZ
- $r_{\text{mittel}}$  → äquivalente Querschnittsfläche
- $r_{\text{klein}}$  → kleinerer Kontakt-Radius  $a_{\text{ct}}$



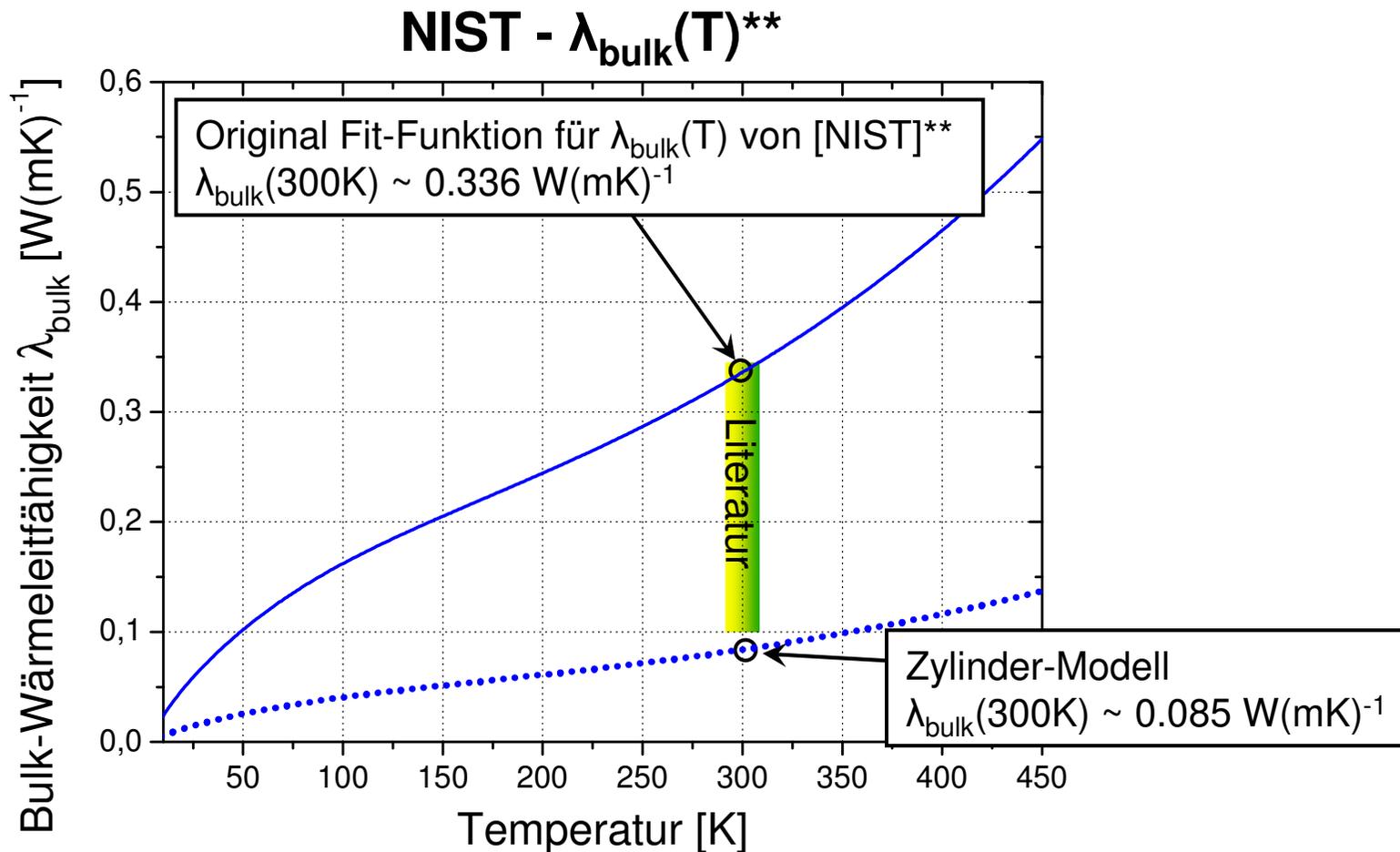
$$R_{\text{Gesamt, EHZ-Mittel}} = \frac{R_{\text{EHZ}}^{1ct} + 2 \cdot R_{\text{EHZ}}^{2ct} + R_{\text{EHZ}}^{4ct}}{4}$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{\lambda_{\text{solid, trilobal}}(T)}}$$

# Skalierte Bulk-Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{bulk}}$ für Polyimid



In der Literatur\*: @ 300K  $\lambda_{\text{bulk}} = 0.1 \dots 0.35 \text{ W(mK)}^{-1}$



\* *Polyimid (PI) - Physical properties*, <http://www.goodfellow.com/csp/active/static/G/Polyimid.HTML>

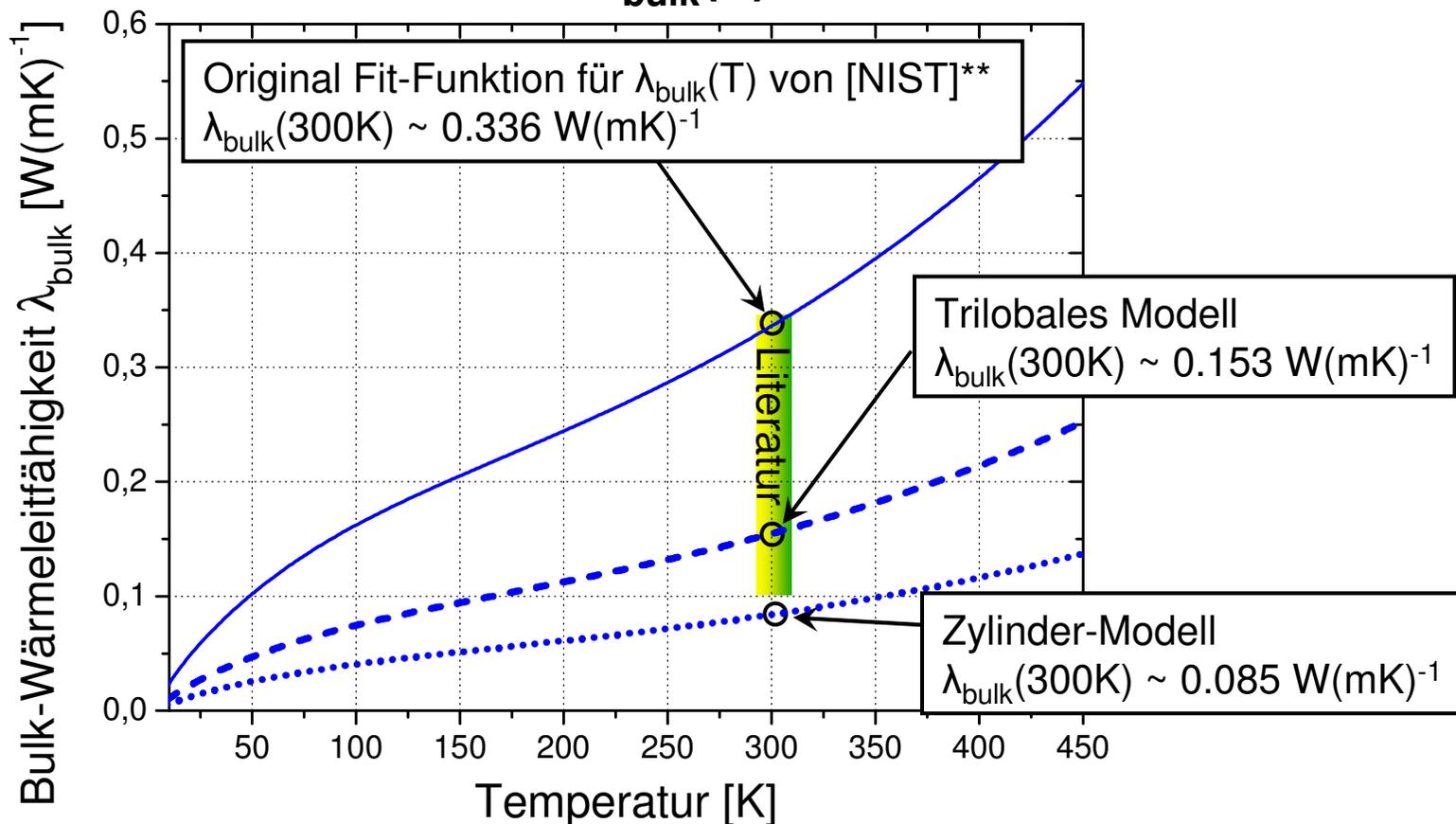
\*\* *Polyimid (PI) - Physical properties (fit-function)*, [http://cryogenics.nist.gov/MPropsMAY/Polyimide%20Kapton/PolyimideKapton\\_rev.htm](http://cryogenics.nist.gov/MPropsMAY/Polyimide%20Kapton/PolyimideKapton_rev.htm)

# Skalierte Bulk-Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{bulk}}$ für Polyimid



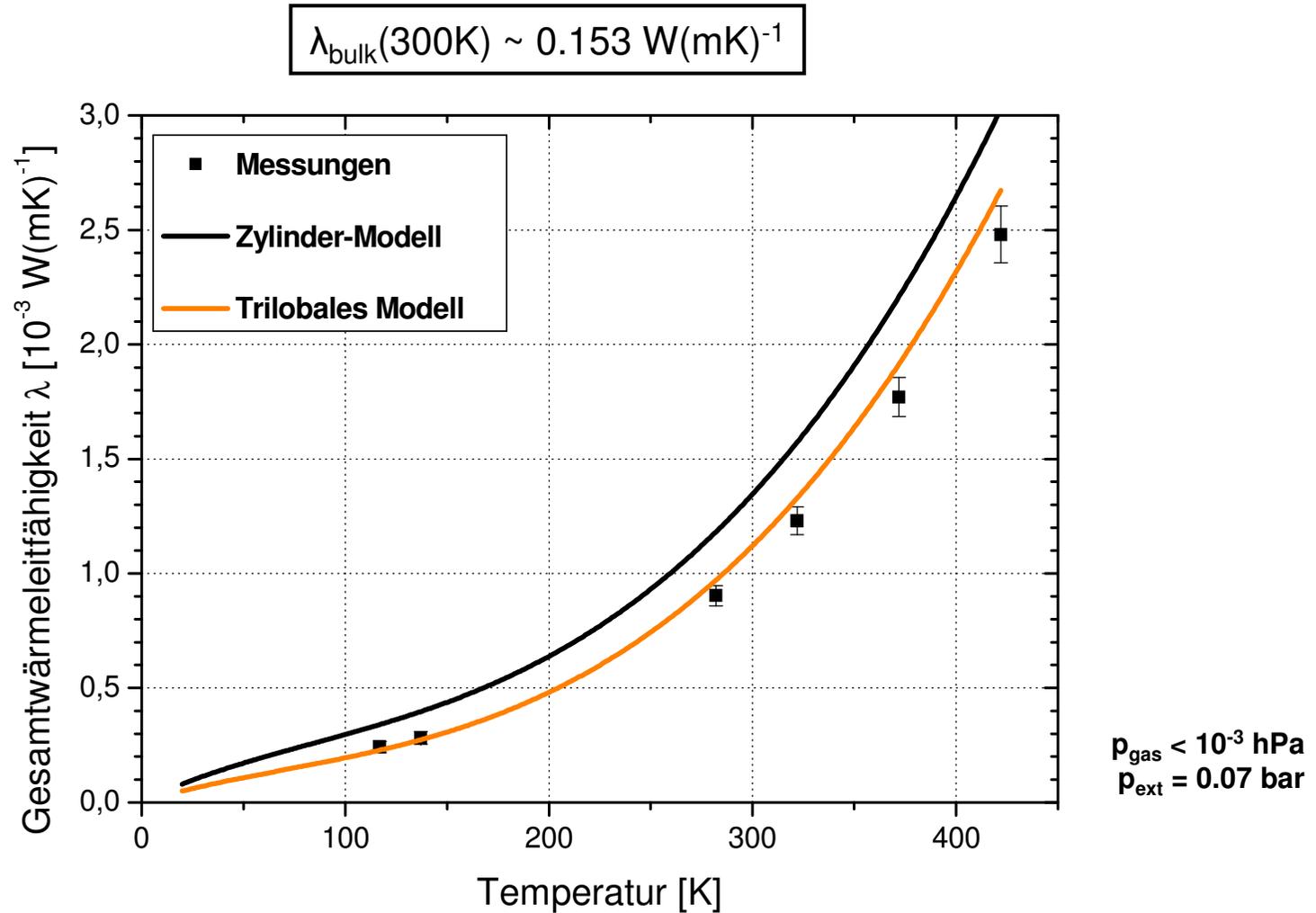
In der Literatur\*: @ 300K  $\lambda_{\text{bulk}} = 0.1 \dots 0.35 \text{ W(mK)}^{-1}$

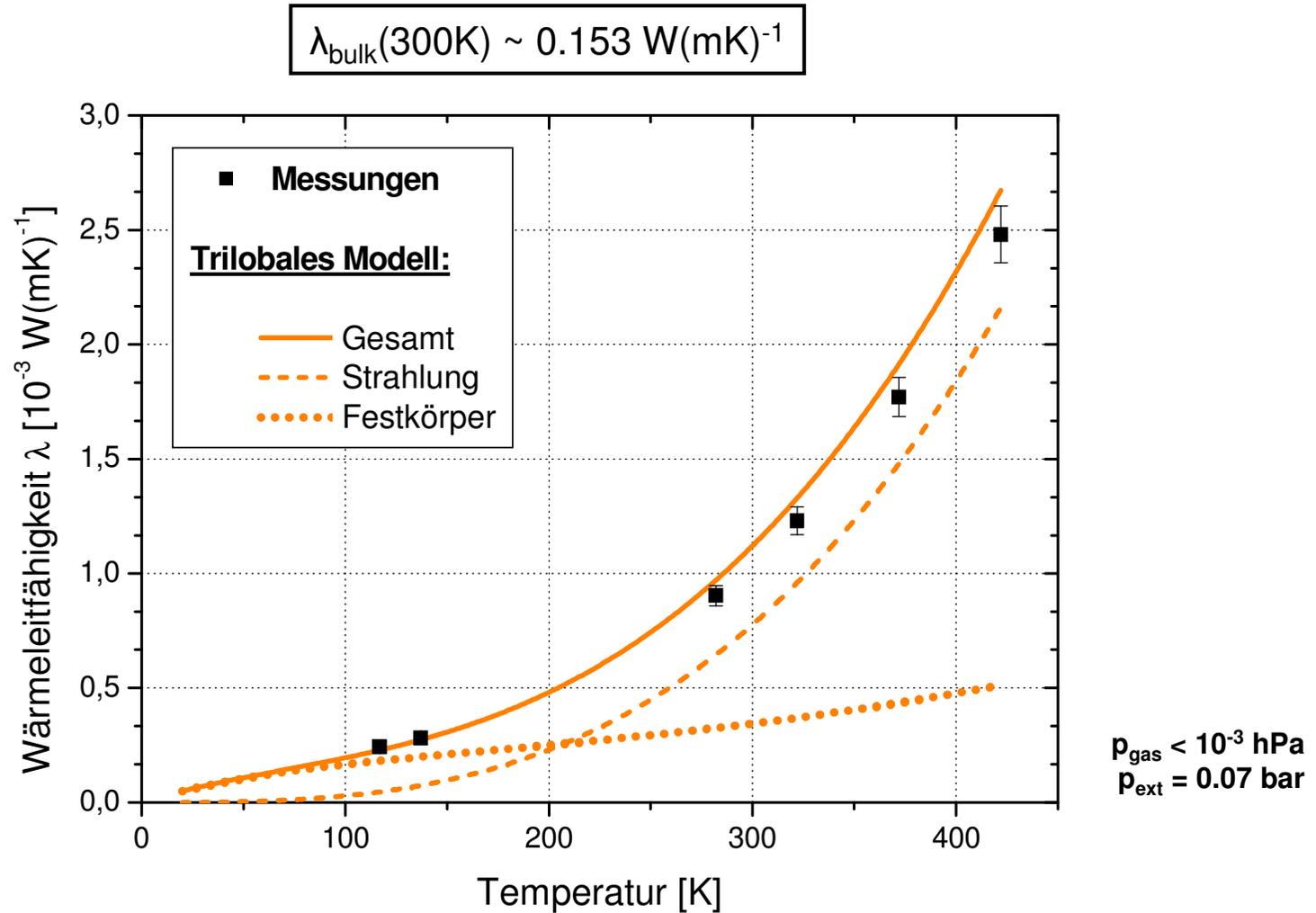
## NIST - $\lambda_{\text{bulk}}(T)$ \*\*



\* *Polyimide (PI) - Physical properties*, <http://www.goodfellow.com/csp/active/static/G/Polyimide.HTML>

\*\* *Polyimide (PI) - Physical properties (fit-function)*, [http://cryogenics.nist.gov/MPropsMAY/Polyimide%20Kapton/PolyimideKapton\\_rev.htm](http://cryogenics.nist.gov/MPropsMAY/Polyimide%20Kapton/PolyimideKapton_rev.htm)





## Modell:

- Das Trilobale Faser-Modell zeigt gute Übereinstimmung mit den Messungen
- Vernachlässigung des trilobalen Faser-Querschnitts:
  - systematischer Fehler ~60% für  $\lambda_{\text{solid}}$

## Messungen:

- Rekordverdächtig niedrige mittlere Wärmeleitfähigkeit:
  - $\lambda_{m,77K-300K} = 0.48 \cdot 10^{-3} \text{ W(mK)}^{-1}$

Ende



Diese Arbeit wurde unterstützt vom



innerhalb des Forschungsprojektes



**icefuel<sup>®</sup>**

(FKZ 16SV2357):