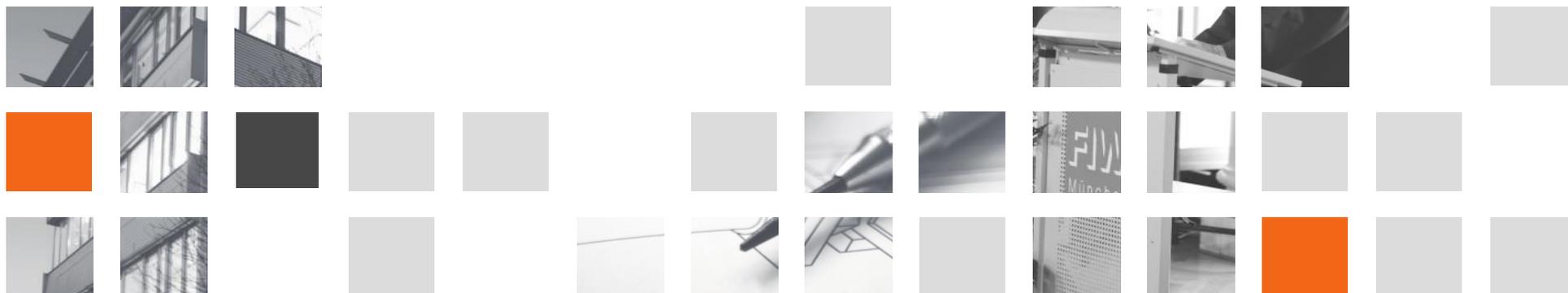


Blähglas-Granulat

AKT Ringvergleich Wärmeleitfähigkeit 100K – 800K

Dipl.-Ing. Roland Schreiner



Qualifikation des Ringvergleichsmaterials

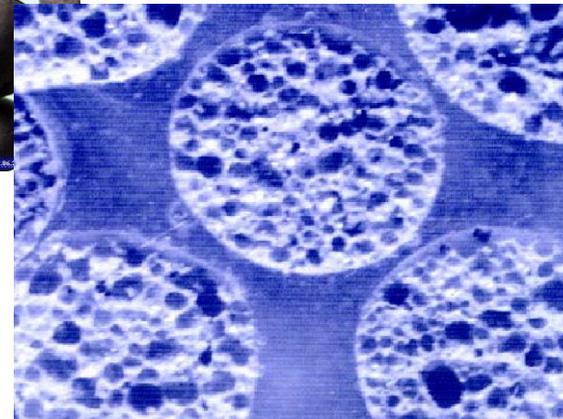
- Temperaturbeständig bis 800 K
- Probekörper verfügbar in beliebigen Dicken
- Messbar mit unterschiedlichen Prüfmethoden
- Nicht komprimierbar (konstante Dichte)
- Homogen und isotrop
- Wärmetransfer-Modell verfügbar
 - Temperaturabhängig
 - Modell: Poröse Dämmstoffe, (Leitung und Strahlung)
- Eignungsprüfungen für registrierte Labore bei VDI/Keymark $\pm 3\%$

Qualifikation des Ringvergleichsmaterials

Eigenschaften des Blähglas-Granulates



Korngröße: 1 – 2 mm
Schüttdichte: $250 \text{ kg/m}^3 \pm 10\%$
Wärmeleitfähigkeit ($10 \text{ }^\circ\text{C}$) = ca. $0,070 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
Maximale Anwendungstemperatur = $550 \text{ }^\circ\text{C}$



Das Wärmetransport Modell

Poröse Stoffe

$$\lambda_t = \lambda_s \cdot (1 - \psi^{(1-\gamma_s)}) + \frac{\psi^{(1-2\cdot\gamma_s)}}{\frac{\psi^{-\gamma_s}}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_{\text{Luft}} + \lambda_{\text{rP}}}}$$

Mit:

Porosität $\psi = 1 - \frac{\rho}{\rho_s}$

s = Feststoff

Strahlung $\lambda_{\text{rP}} = 4 \cdot \sigma \cdot \bar{f} \cdot s_d \cdot T^3$ mit Albedo

Akkommodation γ_s

Annahmen für das Modell

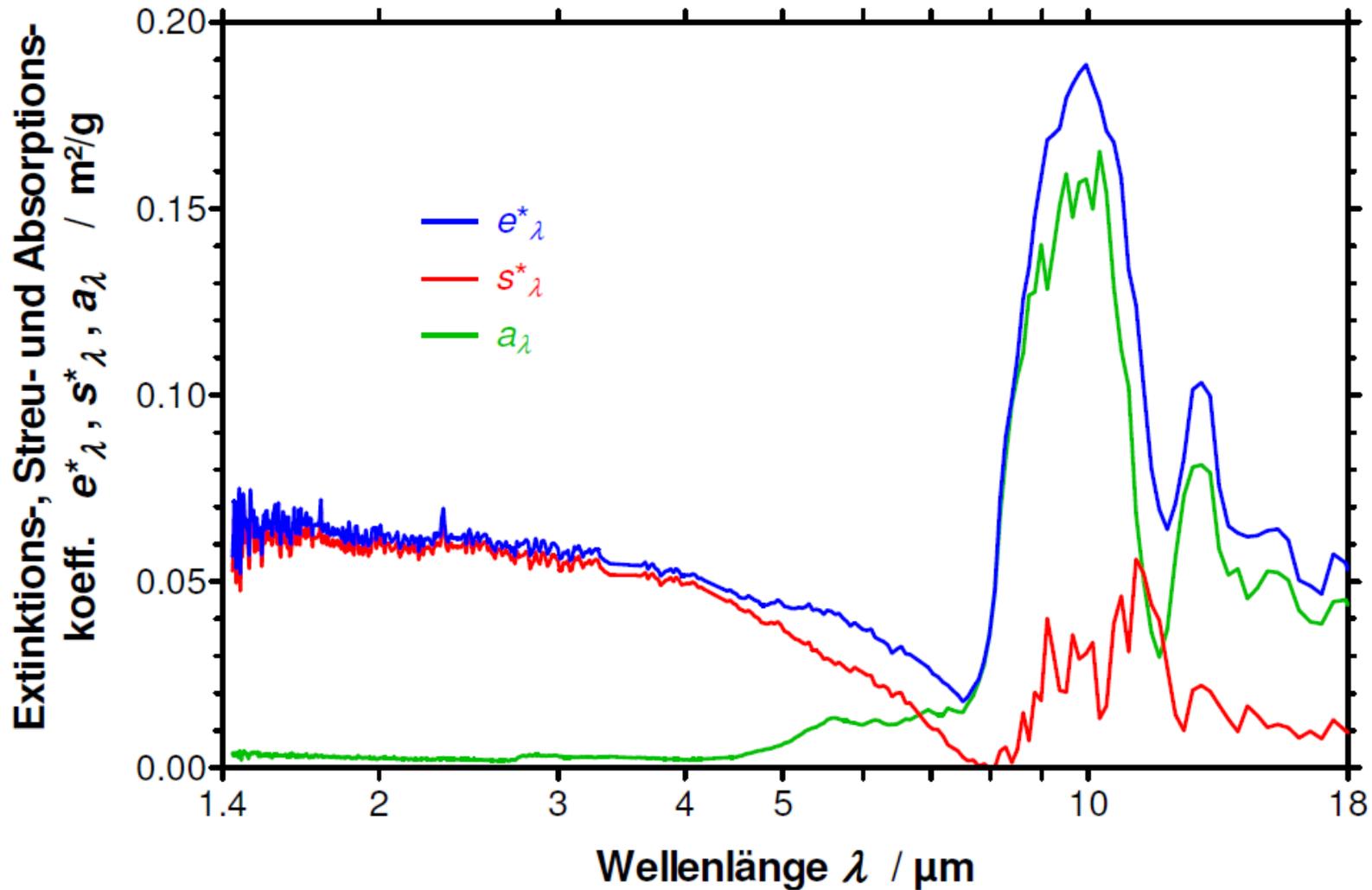
- Wärmeleitfähigkeit des Feststoffes sehr hoch

$$\lambda_s \gg \lambda_{\text{Luft}} + \lambda_{\text{rP}}$$

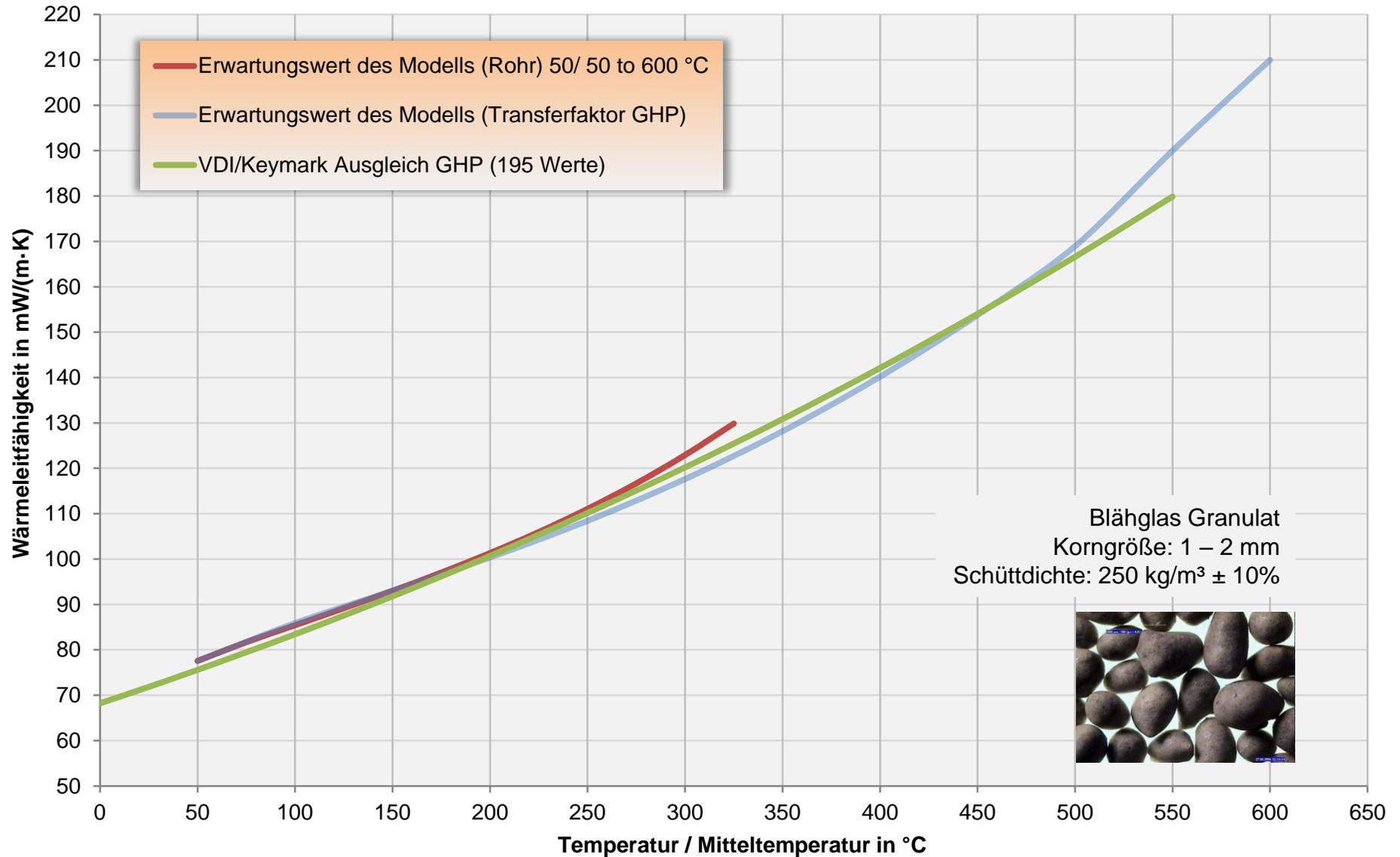
$$\lambda_s = 1 \text{ W / (m} \cdot \text{K)}$$

- Dichte des Feststoffes = 2500 kg/m³
- Porösität = 0,90
- Albedo und Akkommodation bekannt

Strahlungseigenschaften (Blähglaspulver)



Das Wärmetransport Modell



AKT Ringvergleich Wärmeleitfähigkeit Teilnehmer



Nr.	Firma / Institut Ansprechpartner	Apparat / Verfahren	Temperaturbereich	Randbedingung Variationen	Menge Blähglas
1	NETZSCH-Gerätebau GmbH Herr Dr. Jürgen Blumm	Zweiplattenapparat	120 K bis 800 K	Labor	10 Liter
2	PTB Herr Dr. Ulf Hammerschmidt	?	?	?	1/4 Liter
3	AIT Herr Dr. Wolfgang Hohenauer	Transient Hot Bridge	298 K	Labor	1/2 Liter
4	DLR Frau Dr. Nicole Pflieger	Heizdrahtverfahren	400 K bis 800 K	Labor	10 Liter
5	ZAE Bayern Herr Frank Hemberger	Zweiplattenapparat A	100 K bis 500 K	Gasdruck, Belastungsdruck	10 Liter
		Zweiplattenapparat B	100 K bis 500 K	Gasdruck, Belastungsdruck	
		Heizdrahtverfahren	300 K bis 800 K	Labor	
6	Evonik Industries AG Herr Dr. Matthias Geisler	Hot Disk	300/400 K	Labor, Vakuum, N ₂	5 Liter
7	Linseis Messgeräte GmbH Herr Dr. Heinz Renner	Transient Hot Bridge Heat Flow Meter	300 K 300 K	Labor	10 Liter
8	TU Bergakademie Freiberg-IWTT Frau Dr.-Ing. Rhena Wulf	Rohrapparatur Plattenapparatur			10 Liter
9	FIW München Herr Dipl.-Ing. Roland Schreiner	Zweiplattenapparat tiefe Temperaturen	100 K bis 300 K	Labor	10 Liter
		Zweiplattenapparate hohe Temperaturen	300 K bis 800 K	Labor	
		Rohrverfahren	300 K bis 620 K	Labor, Mitteltemperatur	
		Kugel	300 K bis 420 K	Labor, Mitteltemperatur	

Messverfahren (Labore)



- Stationäre
 - Ebene $\Sigma 5$
 - Zweiplattenverfahren (1, 5A, 5B, 9A)
 - Wärmestrom-Messplatten-Verfahren (7A)
 - Geformte $\Sigma 3$
 - Rohrverfahren (8, 9B)
 - Kugel (9C)

 - Dynamische $\Sigma 6$
 - Transient Hot Bridge (3, 7B)
 - Heizdrahtverfahren (4, 5C, 5D)
 - Hot Disk (6)
- $\Sigma 14$**

Messergebnisse (Labor 1)

Messverfahren	Zweiplattenverfahren		
Messunsicherheit	2% - 4%		
Dichte	?		
Dicke	52 mm		
Temperaturdifferenz	30 K		
Temperatur	Wärmeleitfähigkeit		Abweichung
in °C	Messwert in W/(mK)	VDI/Keymark in W/(mK)	VDI/Keymark in %
50	0,07844	0,07558	3,8
100	0,08651	0,08343	3,7
150	0,09587	0,09180	4,4
200	0,10368	0,10070	3,0
250	0,11239	0,11016	2,0
300	0,12364	0,12020	2,9
350	0,12791	0,13085	-2,2
400	0,13799	0,14212	-2,9
450	0,14837	0,15403	-3,7
500	0,15899	0,16662	-4,6
		mittlere Streuung	3

Messergebnisse (Labor 3)



Messverfahren	Transient Hot Bridge		
Messunsicherheit	3,9% - 5,6%		
Dichte	236 kg/m ³		
Dicke	-		
Temperaturdifferenz	dynamisch		
Temperatur in °C	Wärmeleitfähigkeit		Abweichung
	Messwert in W/(mK)	VDI/Keymark in W/(mK)	VDI/Keymark in %
30	0,055	0,073	-24,2
50	0,063	0,076	-16,6
100	0,068	0,083	-18,5
150	0,071	0,092	-22,7
175	0,070	0,096	-27,2
		mittlere Streuung	22

Messergebnisse (Labor 4)

Messverfahren	Hitzdraht		
Messunsicherheit	5%		
Dichte	226 kg/m ³		
Dicke	-		
Temperaturdifferenz	dynamisch		
Temperatur	Wärmeleitfähigkeit		Abweichung
in °C	Messwert in W/(mK)	VDI/Keymark in W/(mK)	VDI/Keymark in %
25,0	0,08	0,07	11
94,4	0,09	0,08	9
192,9	0,11	0,10	11
292,9	0,13	0,12	9
393,3	0,16	0,14	14
493,1	0,19	0,16	15
593,4	0,21	0,19	9
		mittlere Streuung	11

Messergebnisse (Labor 5A)

Messverfahren	Zweiplattenverfahren Lola 4			
Messunsicherheit	4,4%			
Dichte	220 kg/m ³			
Dicke	ca. 20 mm			
Temperaturdifferenz	?			
Temperatur		Wärmeleitfähigkeit		Abweichung
in K	in °C	Messwert in W/(mK)	VDI/Keymark in W/(mK)	VDI/Keymark in %
120	-153,15			
200	-73,15			
300	26,85	0,06621	0,07212	-8,2
350	76,85	0,07470	0,07973	-6,3
400	126,85	0,08442	0,08786	-3,9
450	176,85	0,09312	0,09651	-3,5
500	226,85			
600	326,85			
700	426,85			
800	526,85			
mittlere Streuung				5

Messergebnisse (Labor 5B)

Messverfahren	Zweiplattenverfahren Lola 3			
Messunsicherheit	4,4%			
Dichte	234 kg/m ³			
Dicke	?			
Temperaturdifferenz	?			
Temperatur		Wärmeleitfähigkeit		Abweichung
in K	in °C	Messwert in W/(mK)	VDI/Keymark in W/(mK)	VDI/Keymark in %
120	-153,15	0,03743		
200	-73,15	0,05494		
300	26,85	0,07138	0,07212	-1,0
350	76,85	0,07956	0,07973	-0,2
400	126,85	0,08775	0,08786	-0,1
450	176,85	0,09544	0,09651	-1,1
500	226,85			
600	326,85			
700	426,85			
800	526,85			
mittlere Streuung				1

Messergebnisse (Labor 5C)



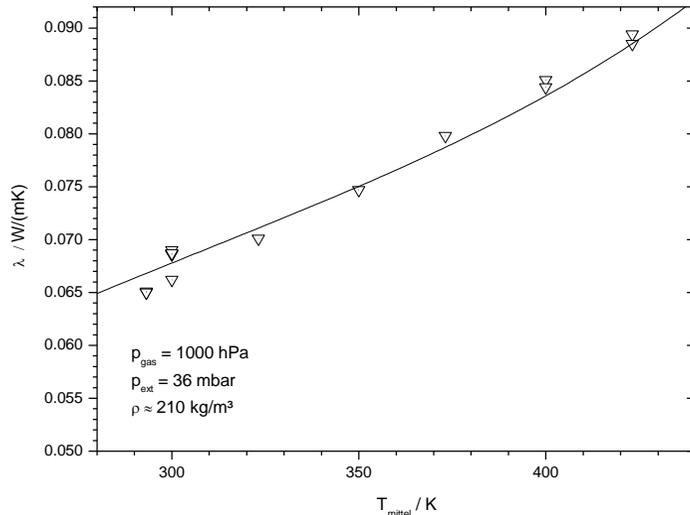
Messverfahren	Hitzdraht Platin 100µm				
Messunsicherheit	5% - 10%				
Dichte	232 kg/m ³				
Dicke	-				
Temperaturdifferenz	dynamisch				
Temperatur		Wärmeleitfähigkeit		Abweichung	
in K	in °C	Messwert in W/(mK)	VDI/Keymark in W/(mK)	VDI/Keymark in %	
120	-153,15				
200	-73,15				
300	26,85	0,0803	0,0721	11,3	
350	76,85				
400	126,85	0,0944	0,0879	7,4	
450	176,85				
500	226,85	0,112	0,106	6,0	
600	326,85	0,130	0,126	3,3	
700	426,85	0,144	0,148	-3,0	
800	526,85	0,158	0,174	-9,0	
mittlere Streuung				7	

Messergebnisse (Labor 5D)

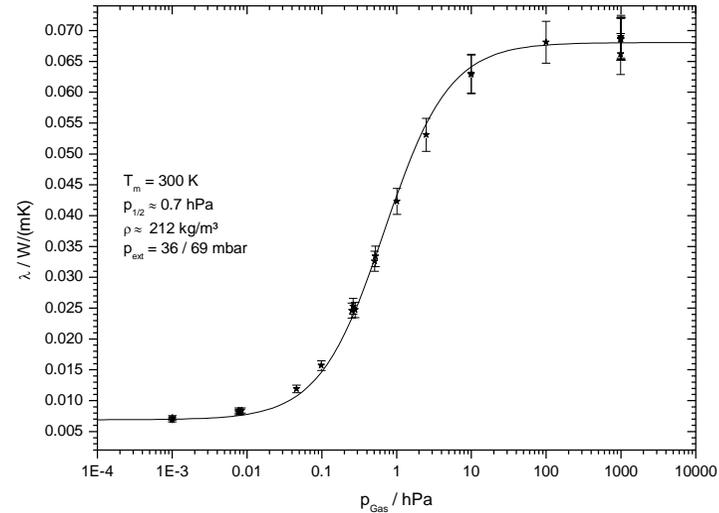
Messverfahren	Hitzdraht Platin 100µm			
Messunsicherheit	5% - 10%			
Dichte	205 kg/m ³			
Dicke	-			
Temperaturdifferenz	dynamisch			
Temperatur		Wärmeleitfähigkeit		Abweichung
in K	in °C	Messwert in W/(mK)	VDI/Keymark in W/(mK)	VDI/Keymark in %
120	-153,15			
200	-73,15			
300	26,85	0,0737	0,0721	2,2
350	76,85			
400	126,85	0,0927	0,0879	5,5
450	176,85			
500	226,85	0,111	0,106	5,2
600	326,85	0,125	0,126	-1,1
700	426,85	0,142	0,148	-4,5
800	526,85	0,163	0,174	-6,4
mittlere Streuung				4

Messergebnisse (Labor 5)

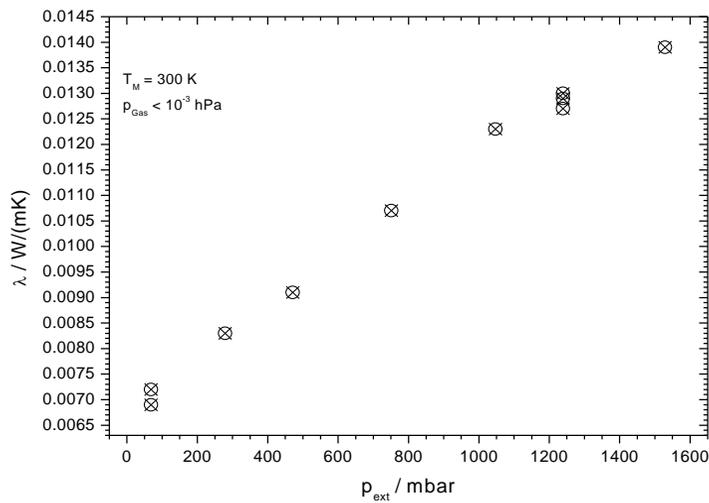
Wärmeleitfähigkeit Temperaturabhängig



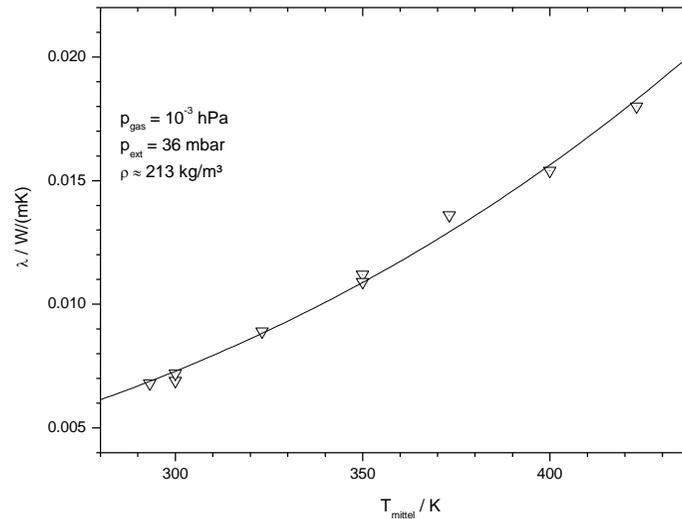
Gasdruckabhängige Wärmeleitfähigkeit



Wärmeleitfähigkeit Belastungsdruckabhängig



Wärmeleitfähigkeit Temperaturabhängig evakuiert



Messergebnisse (Labor 6)



Messverfahren	Hot Disk Kapton 6,4 mm			
Messunsicherheit	2% - 4%			
Dichte	229 kg/m ³			
Dicke	-			
Temperaturdifferenz	dynamisch			
Temperatur		Wärmeleitfähigkeit		Abweichung
in K	in °C	Messwert in W/(mK)	VDI/Keymark in W/(mK)	VDI/Keymark in %
1 bar				
400	126,85	0,0904	0,0879	2,9
300	26,85	0,0739	0,0721	2,5
<0,0001 bar				
400	126,85	0,0380		
300	26,85	0,0299		
mittlere Streuung				3

Messergebnisse (Labor 7A)



Messverfahren	Wärmestrom-Messplatte		
Messunsicherheit	?		
Dichte	?		
Dicke	50 mm		
Temperaturdifferenz	?		
Temperatur	Wärmeleitfähigkeit		Abweichung
in °C	Messwert in W/(mK)	VDI/Keymark in W/(mK)	VDI/Keymark in %
25	0,069	0,072	-4,0
		mittlere Streuung	4

Messergebnisse (Labor 7B)



Messverfahren	Transient Hot Bridge		
Messunsicherheit	?		
Dichte	?		
Dicke	-		
Temperaturdifferenz	dynamisch		
Temperatur	Wärmeleitfähigkeit		Abweichung
	Messwert	VDI/Keymark	VDI/Keymark
in °C	in W/(mK)	in W/(mK)	in %
25	0,070	0,072	-3,3
		mittlere Streuung	3

Messergebnisse (Labor 8)



Messverfahren	Rohr $d_i=16\text{mm}/s=12\text{mm}$, 370 mm
Messunsicherheit	4,3% - 4,6%
Dichte	236 kg/m ³
Dicke	12 mm
Temperaturdifferenz	60 K - 340 K

	Temperatur	Wärmeleitfähigkeit		Abweichung
	in °C	Messwert in W/(mK)	VDI/Keymark in W/(mK)	VDI/Keymark in %
Messreihe 1			Rohr	
	76,6	0,096	0,080	19,9
	112,2	0,096	0,086	12,1
	153,2	0,104	0,093	12,8
	186,9	0,111	0,099	12,3
	259,2	0,126	0,113	12,4
	290,9	0,131	0,119	10,3
Messreihe 2				
	75,0	0,094	0,079	18,3
	104,6	0,097	0,084	14,8
	142,8	0,103	0,091	13,7
	193,3	0,111	0,100	11,0
	252,1	0,124	0,111	11,3
	285,9	0,130	0,118	10,3
	325,1	0,141	0,126	11,2
	370,0	0,149	0,136	9,3
			mittlere Streuung	13

Messergebnisse (Labor 9A)



Messverfahren	Zweiplattenverfahren		
Messunsicherheit	5%		
Dichte	250 kg/m ³		
Dicke	50 mm		
Temperaturdifferenz	30 K - 100 K		
Temperatur	Wärmeleitfähigkeit		Abweichung
in °C	Messwert in W/(mK)	VDI/Keymark in W/(mK)	VDI/Keymark in %
46,0	0,0736	0,07498	-1,8
122,5	0,0840	0,08713	-3,6
199,2	0,0991	0,10055	-1,4
274,9	0,1120	0,11509	-2,7
350,1	0,1260	0,13087	-3,7
426,2	0,1430	0,14828	-3,6
502,0	0,1630	0,16714	-2,5
		mittlere Streuung	3

Messergebnisse (Labor 9B)



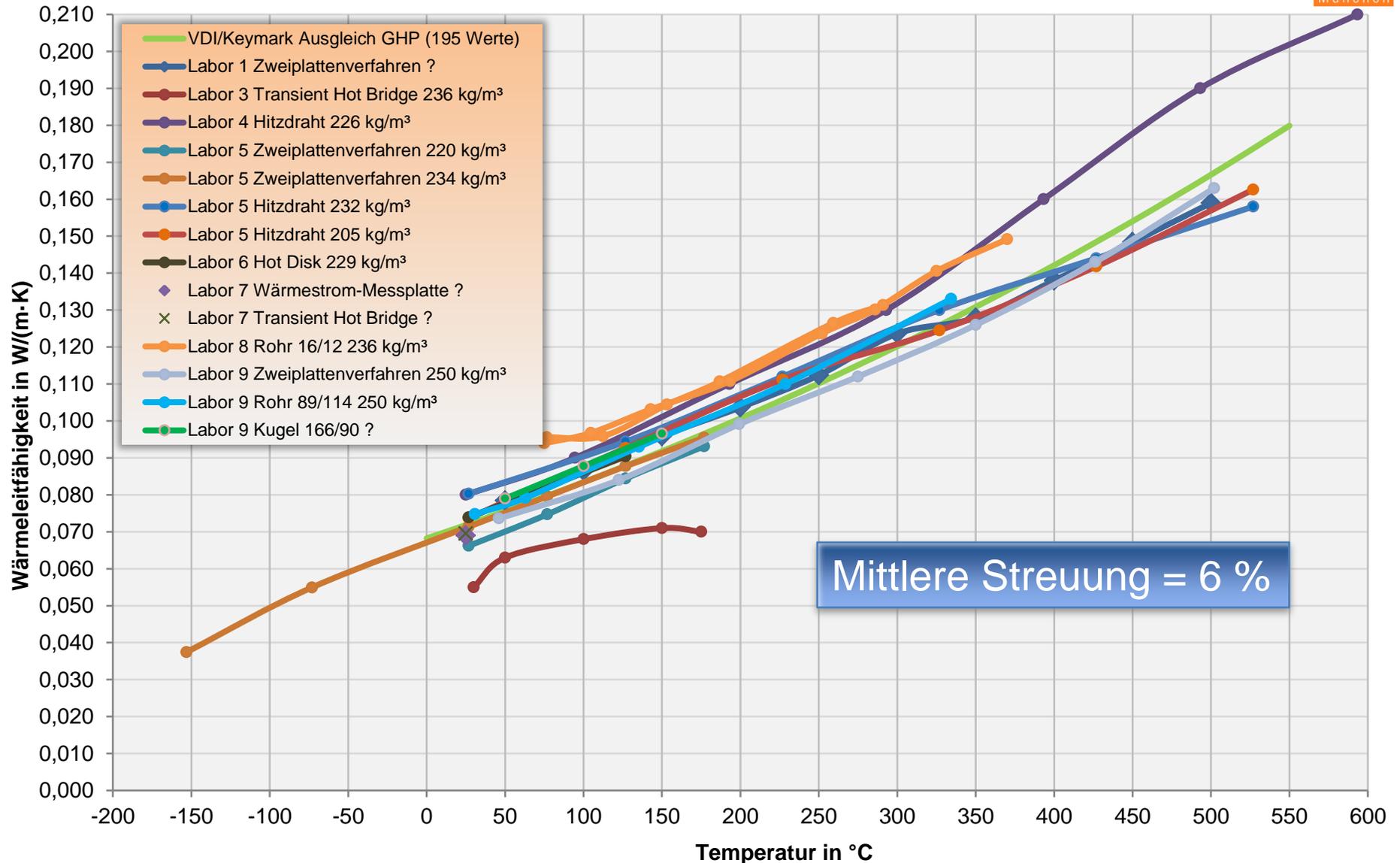
Messverfahren	Rohr di=89mm/s=114mm, 3000mm		
Messunsicherheit	3%		
Dichte	248 kg/m ³		
Dicke	114 mm		
Temperaturdifferenz	20 K - 500 K		
Mittel- Temperatur in °C	Wärmeleitfähigkeit Messwert in W/(mK)	VDI/Keymark in W/(mK)	Abweichung VDI/Keymark in %
		Rohr	
30,7	0,0748	0,07270	2,9
63,0	0,0792	0,07763	2,0
135,4	0,0930	0,08962	3,8
228,6	0,1100	0,10713	2,7
334,3	0,1330	0,13002	2,3
		mittlere Streuung	3

Messergebnisse (Labor 9C)

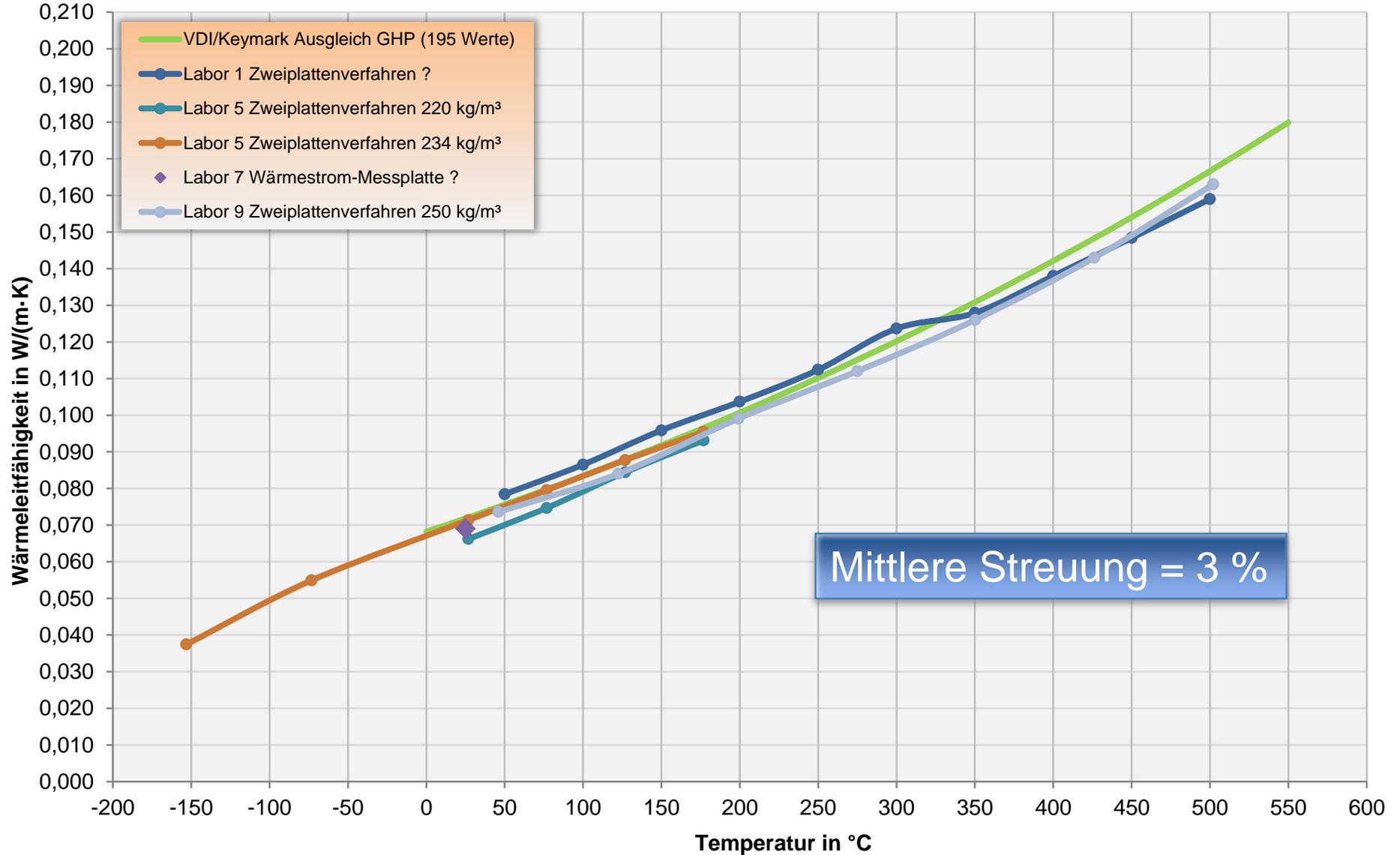


Messverfahren	Kugel $d_i=166\text{mm}/s=90\text{mm}$		
Messunsicherheit	3%		
Dichte	?		
Dicke	90 mm		
Temperaturdifferenz	15 K - 200 K		
Mittel- Temperatur in °C	Wärmeleitfähigkeit		Abweichung
	Messwert in W/(mK)	VDI/Keymark in W/(mK)	VDI/Keymark in %
		Rohr	
50	0,0790	0,07558	4,5
100	0,0878	0,08343	5,2
150	0,0966	0,09180	5,2
		mittlere Streuung	5

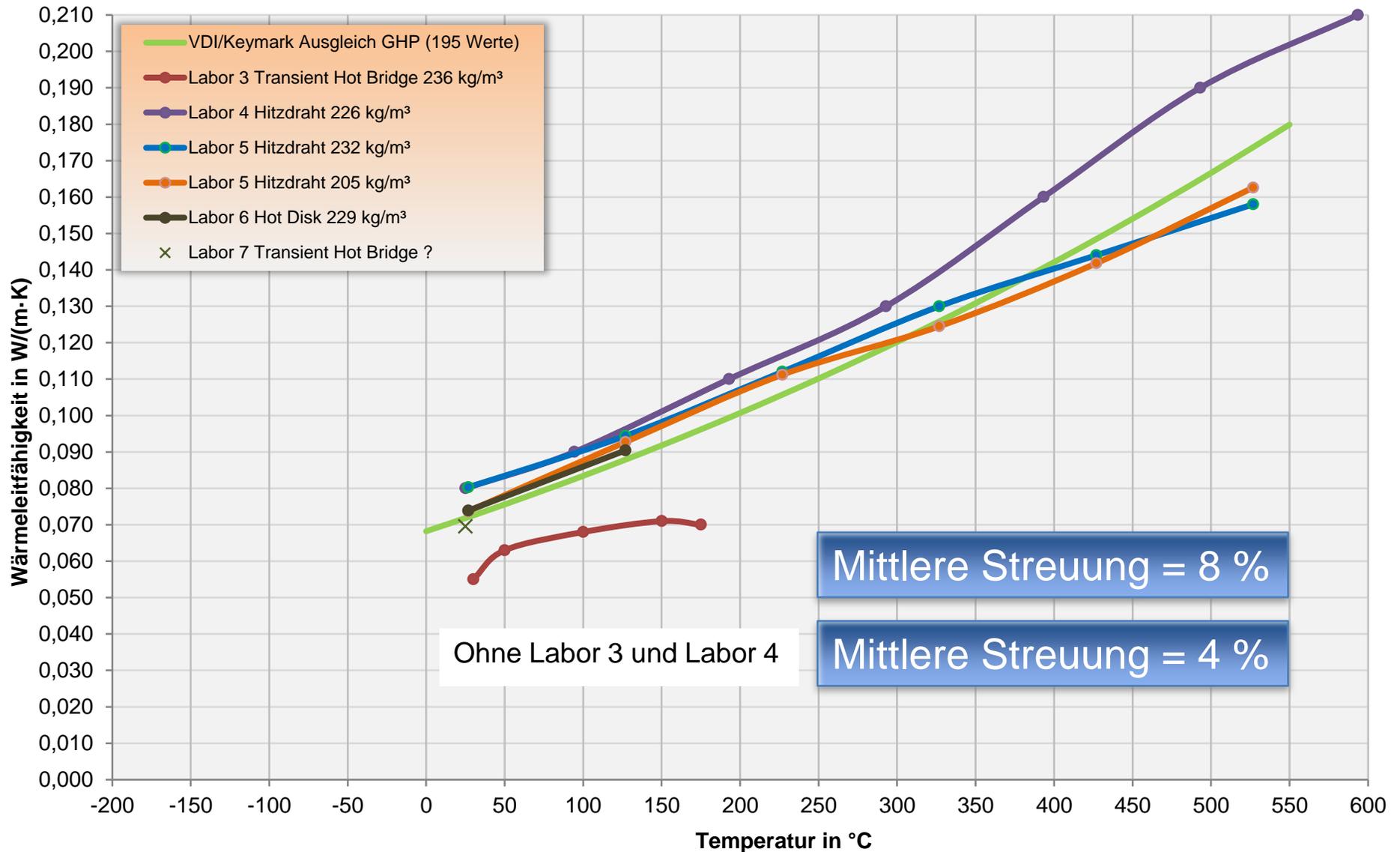
Messergebnisse (gesamt)



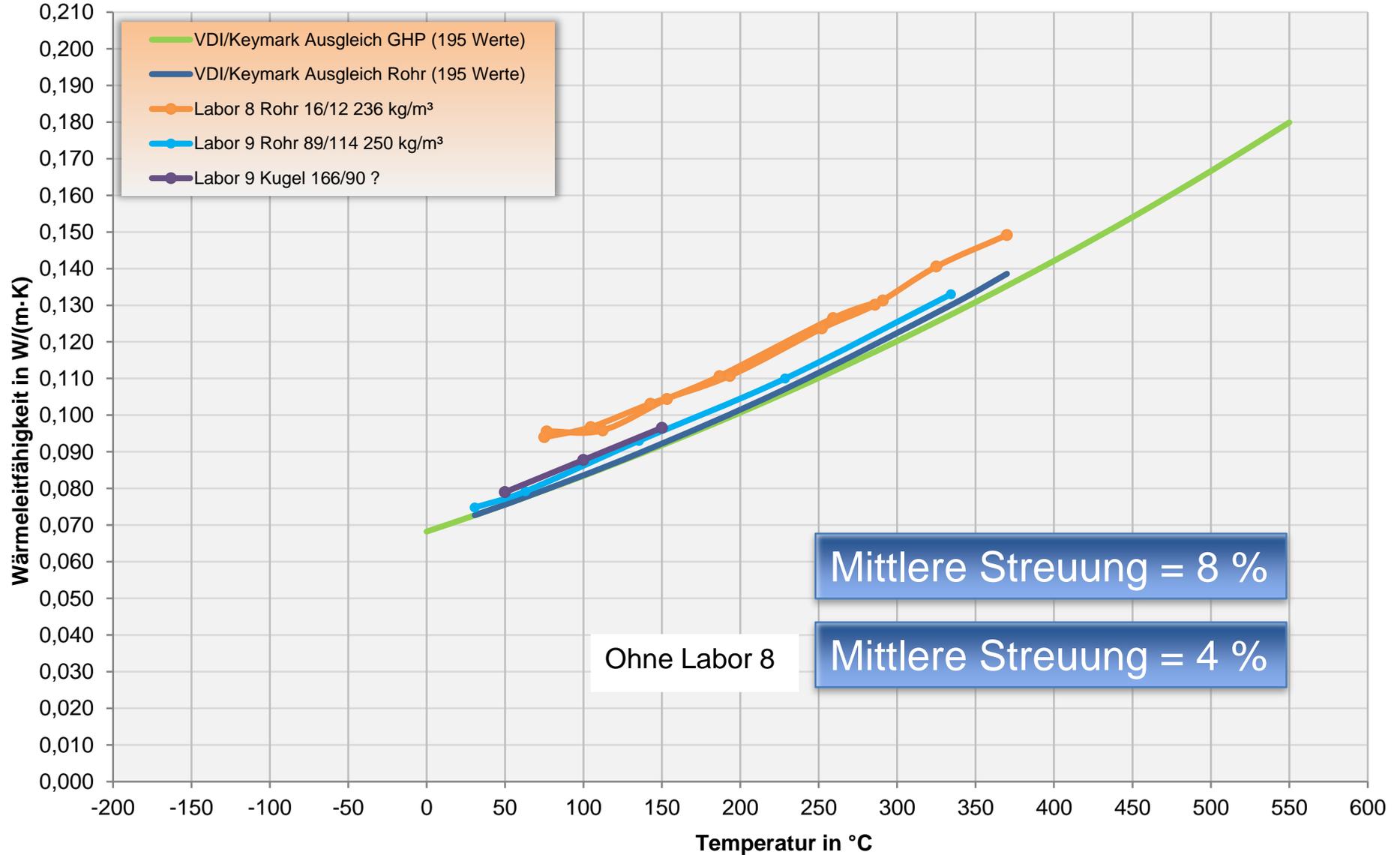
Messergebnisse (stationäre Verfahren)



Messergebnisse (dynamische Verfahren)



Messergebnisse (Sonstige)



Mittlere Streuungen in %

Labor	Verfahren	gesamt	stationär	dynamisch	sonstige
1	ZPV	3	3		
3	THB	22		22	
4	Hitzdraht	11		11	
5A	ZPV	5	5		
5B	ZPV	1	1		
5C	Hitzdraht	7		7	
5D	Hitzdraht	4		4	
6	Hot Disk	3		3	
7A	WSM	4	4		
7B	THB	3		3	
8	Rohr	13			13
9A	ZPV	3	3		
9B	Rohr	3			3
9C	Kugel	5			5
		Σ 14	Σ 5	Σ 6	Σ 3
Mittlere Streuung		6	3	8	7
Mittlere Streuung mit Ausreißern		4	3	4	4

Ausblick

- Einfluss der Dichte aufnehmen,
- Daten ergänzen, Ausreißertest verwenden
- Diskussion in Bezug auf die Auswertung
 - Ausgleichskurve
 - VDI/Keymark Mittelwertskurve
 - Ringversuch AKT Mittelwertskurve
 - Wärmetransport Modell
 - Getrennt nach Verfahren
 - Sensorgröße / Messfläche
- Verbesserung des Wärmetransport Modells
- Schlussbericht, Veröffentlichung